

SWARM

**DESIGNING
THROUGH
IN**

**EMBEDDED TECTONIC BEHAVIORS
IN
SWARM ROBOTIC SYSTEMS**

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DA - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE/ARCHITETTURA**

**TESI DI LAUREA IN
ARCHITETTURA E COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA 3
AA 2013/2014**

**di
MICHELE SEMEGHINI**

**relatore
ALESSIO ERIOLI**

**correlatori
MASSIMO CIORELLA
MARTINO COLONNA**

**STRUCT-
ABILITY
CONS**

INDICE

9 / Abstract

INTRODUZIONE

10 / Robot e Architettura...

12 / ...buchi da seta e termiti

THEORETICAL FRAMEWORK

14 / Il Paradosso del Sorite

15 / Emergence

21 / Stigmergia

23 / Intelligenza e Robotica di Sciame

30 / Agency

34 / Pattern Formation

STUDI SUL MATERIALE

- 36 / Ipotesi iniziali di lavoro
- 38 / Simulazione
- 44 / PoliCaprolattone
- 46 / Composti Ionici / Soluzioni
- Supersature / Acetato di Sodio

STUDI TECNICI

- 48 / Ipotesi iniziali di lavoro
- 57 / Prototipazione e Simulazione di agenti sensibili
- 78 / Prototipazione e Simulazione di agenti costruttori
- 118 / PCB
- 128 / Evoluzione dei prototipi

CONCLUSIONI

134 / Considerazioni finali

140 / Bibliografia

142 / Ringraziamenti

Con questa Tesi di Laurea si muovono i primi passi di una ricerca applicata finalizzata alla costruzione-deposizione di materiale da parte di sciame di mini-robot dal comportamento indipendente che si coordinano tramite segnali lasciati e rilevati nell'ambiente in cui si muovono.

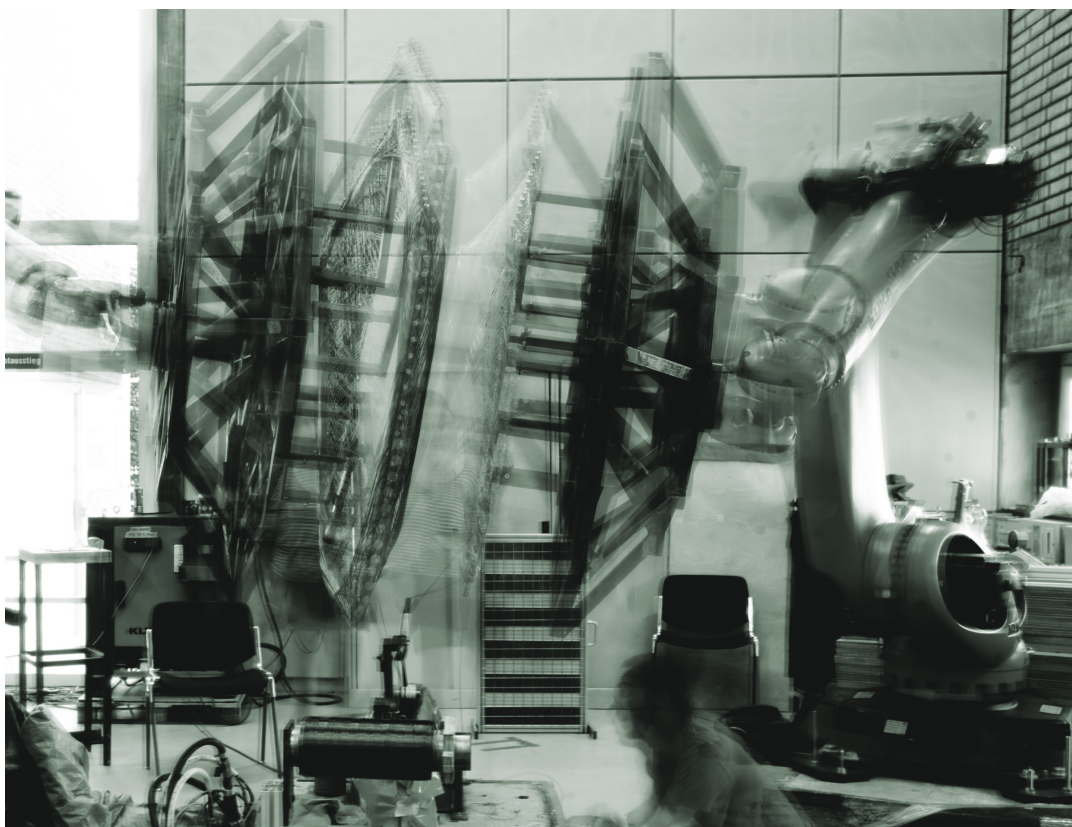
Lo sviluppo di tecniche di progettazione e fabbricazione digitale ha prodotto un aumento nel grado di interconnessione tra tecnologia e design, dunque, di nuove possibilità tettoniche. Le relazioni tettoniche tradizionali stanno infatti subendo una trasformazione radicale, potendo essere esplicitamente informate e dunque mediate attraverso gli strumenti digitali dall'ideazione alla produzione. Questa mediazione *informata* del contenuto tettonico (che opera costantemente) è distintivo di un approccio *material-based* alla progettazione che aumenta l'integrazione tra struttura, materia e forma entro le tecnologie di fabbricazione (R.Oxman).

Dei numerosi processi di fabbricazione per l'architettura che si servono di tecnologia robotica, pochi sono capaci di superare la logica gerarchica, rigida e lineare-sequenziale che serve di fatto agli obiettivi di automazione ed ottimizzazione. La distribuzione di forme di intelligenza semplificata ad un numero elevato di unità robot è quindi qui proposta come alternativa al modello appena descritto. Incorporando semplici decisioni di carattere architettonico negli agenti-robot che costituiscono il sistema distribuito di entità autonome, la loro interazione e le decisioni prese individualmente producono comportamento collettivo e l'integrazione delle suddette relazioni tettoniche.

Nello sviluppo del progetto, si è fatto così riferimento a modelli comportamentali collettivi (di sciame) osservabili in specie comunitarie che organizzano strutture materiali –come termiti e vespe– ed in organismi semplici –come le muffe cellulari della specie *Physarum polycephalum*. Per queste specie biologiche il processo di costruzione non dipende da un 'piano generale' ma è guidato esclusivamente da azioni dei singoli individui che comunicano lasciando tracce chimiche nell'ambiente e modificano il loro comportamento rilevando le tracce lasciate dagli altri individui. A questo scopo, oltre alle simulazioni in digitale, è stato indispensabile sviluppare dei prototipi funzionali di tipo fisico, ovvero la realizzazione di mini-robot dal movimento indipendente, in grado di coordinarsi tra loro tramite segnali lasciati nell'ambiente e capaci di depositare materiale. Lo sviluppo della costruzione creata dallo sciame di robot prevede un processo di crescita verticale dal basso verso l'alto conseguente a cicli di rilascio del materiale trasportato a bordo delle unità robot ed indurimento dello stesso sul piano di deposito. La simulazione ha cercato di considerare per quanto possibile i numerosi vincoli derivanti dalla realizzazione del prototipo funzionale, e viceversa, la progettazione delle componenti hardware si è ispirata ai modelli della simulazione.

Pur considerato lo stato embrionale del prototipo di tecnologia proposto, sono numerosi i feedback forniti dall'esperienza di ricerca: a partire da questi, un'ulteriore fase di approfondimento del progetto saprà intervenire in modo mirato alla correzione dell'architettura stessa del processo, ed al miglioramento della robotica impiegata fin qui a dimostrazione di fattibilità.

INTRO- DUZIONE



- 1 / ICD-ITKE Research Pavilion 2013-14, University of Stuttgart. Il progetto appartiene alla serie di ricerche finalizzate alla realizzazione di padiglioni che mostrino il potenziale di processi che integrino progettazione, simulazione e processi di fabbricazione in architettura. Il progetto è elaborato e realizzato in un anno e mezzo dagli studenti e da ricercatori facenti parte di un team multi-disciplinare costituito da biologi, paleontologi, architetti ed ingegneri.

ROBOT e ARCHITETTURA...

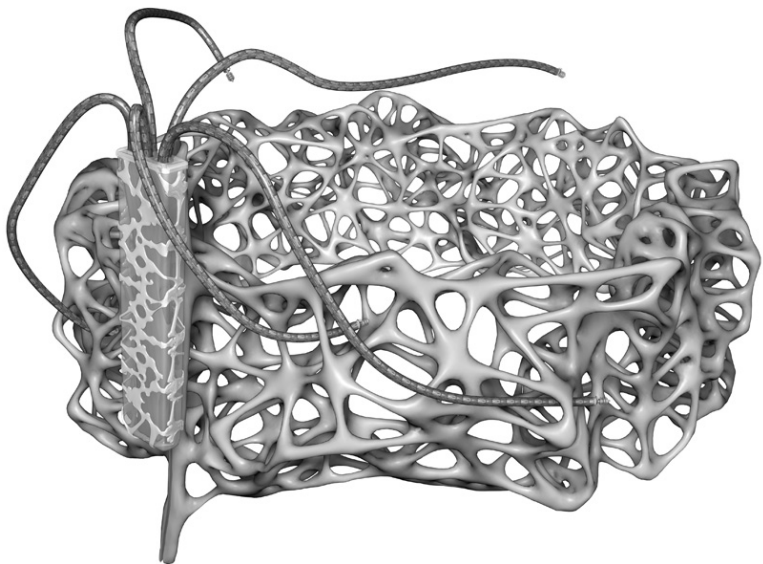
Durante gli ultimi anni si è assistito nelle scuole di Architettura ad un numero sempre crescente di approcci che si servono di robotica, riducendo così la distanza che ha talvolta separato il processo di design e quello costruttivo¹⁻³. La cultura 'hacker', che contestualmente a questi ambiti di ricerca ha personalizzato e modificato macchine e strumenti ispirate alla robotica più sofisticata (tradizionalmente dedicata all'automazione di processi produttivi), ha potuto offrire nuovi strumenti al servizio della progettazione. Il comportamento della macchina – insieme a tutte le sue deliberate imperfezioni – diventa aspetto cruciale

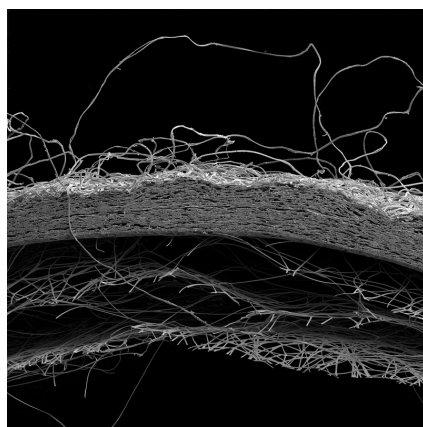


nella definizione dell'architettura che viene generata da quella stessa.

L'evoluzione delle tecniche di fabbricazione procede sempre parallelamente a quella delle strategie di progettazione e dunque agli stili architettonici. Entro tale prospettiva è possibile distinguere due classi di tecniche: da un lato, quelle orientate all'ottimizzazione di un dato processo costruttivo e, dall'altro, quelle capaci di trasformare radicalmente un preciso pensiero costruttivo nonché la concezione stessa di *costruzione*.

- 2 / *FabClay*, Sasha Jokic, Starsk Lara and Nasim Fashami – IAAC. La ricerca è un'esplorazione su possibili sistemi di fabbricazione digitale orientati all'ottimizzazione, adattamento ed indipendenza dal controllo umano. Il lavoro proposto dimostra un nuovo approccio nei riguardi della pratica progettuale architettonica, nonché dei suoi aspetti costruttivi: si propone un ripensamento della concezione stessa di costruzione nel passaggio di ruolo da uomo-costruttore a macchina capace di integrare nuove possibilità offerte dalla tecnologia.
- 3 / *I've heard about...(a flat, fat, growing urban experiment)*, R&Sie(n) e Benoît Durandin. Un dettaglio del VIAB (VIABility e VarIABility), dispositivo che estrude fibrocemento, sviluppato con il Robotic Research Lab della University of Southern California. Il VIAB è inteso come un parassita, come il polipo che vive tra coralli e ne permette la proliferazione. Trova ispirazione nei fasmidi, insetti che si mimetizzano tra foglie e rami.





...BACHI DA SETA E TERMITI

Oggi, i metodi di costruzione che utilizzano robot hanno raggiunto una maturità tale da consentire l'ingresso in una nuova era della progettazione architettonica: per prendere coscienza di questo potenziale è necessario interrogarsi sulle premesse stesse del costruire: concepire la costruzione robotica come mera emulazione del processo costruttivo manuale o come catalizzatore per nuovi processi costruttivi? I processi di fabbricazione additiva – stampa 3D – permettono di realizzare strutture spaziali a partire da modelli digitali. Strati di materiale vengono depositati in successione secondo i percorsi tracciati da un utensile, fino a completa definizione della forma.

E' possibile valutare questa tipologia di tecnica secondo due aspetti: anzitutto, il grado di sofisticazione materiale o la sua 'modulabilità'; in secondo luogo, il livello di comunicazione e coordinazione tra le unità produttive.

Ad un estremo, strutture come il bozzolo prodotto dal *Bombyx Mori* – baco da seta – mostrano una sofisticazione del materiale elevatissima, opera di un singolo organismo (il baco, per l'appunto) che conferisce modulate proprietà meccaniche attraverso l'involucro esterno –più rigido– e quello interno –più soffice⁴.

4 / Il baco da seta (*Bombyx mori*) forma strutture fibrose non-tessute: in assenza di supporti verticali, il baco fila frammenti planari di seta dalle forme e densità variabili. Neri Oxman, fondatrice del *Mediated Matter Group* presso il *MIT Media Lab*, ha proposto un utilizzo del baco in quanto entità capace di "calcolare" l'organizzazione del materiale fibroso, deducendone delle strategie *biology-driven* di ottimizzazione di materia e forma nell'ambito della progettazione strutturale.

In maniera esattamente opposta, i termitai sono l'esito della distribuzione non modulata di materia grezza di una comunità di termiti, specie eminentemente sociale di insetti⁵. Questi due attributi, il livello di sofisticazione materiale ottenuta dal controllo delle proprietà fisiche, ed il livello di comunicazione o coordinazione tra i 'nodi' del processo di fabbricazione –le termiti–, possono essere trasposti nell'ambito della fabbricazione digitale.

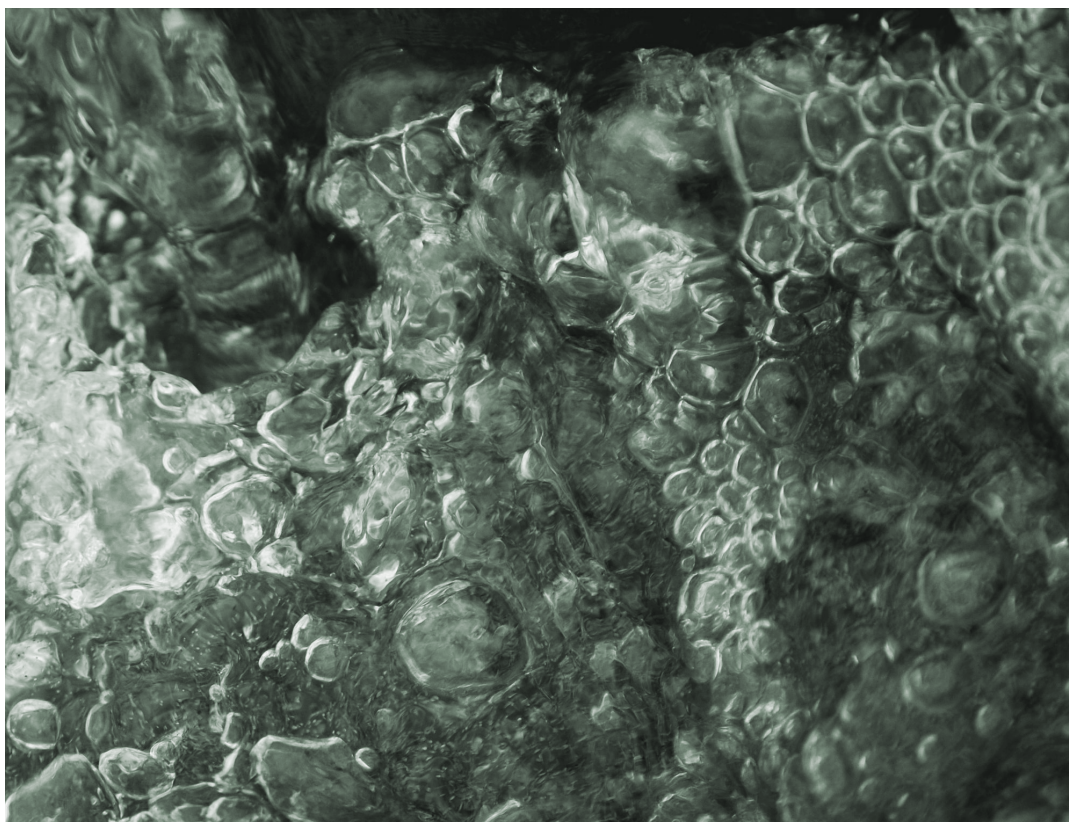


- 5 / I termitai sono costruzioni che manifestano ottime performance di termoregolazione: la colonna d'aria calda che spira sopra il livello del suolo aiuta la circolazione delle correnti d'aria interne alla rete sotterranea. La struttura dei termitai può essere anche piuttosto complessa. Il controllo della temperatura è fondamentale per le specie che coltivano funghi ma anche per quelle che non lo fanno. Mantenere la covata alle condizioni ottimali significa contenere la temperatura entro un intervallo piuttosto ristretto, dunque sono richiesti grandi sforzi ed energie all'intera colonia.
- 6 / Gli algoritmi multi-agente descrivono un approccio alla programmazione del tipo *object-oriented*, ovvero caratterizzato da un'interazione alla scala locale esercitata dall'entità computazionale individuale. Le origini di questo logica di formazione basata su comportamento sono da ricercarsi nell'algoritmo *Boids* sviluppato da Craig Reynolds, che ha radicalmente influenzato la comprensione della simulazione dei comportamenti di sciame. Vedi Craig W. Reynolds, "*Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*" Computer Graphics 21, no.4 (presentato al SIGGRAPH '87 Conference, Luglio 1987):25–34. L'algoritmo si basa sull'interazione di tre comportamenti primari: allineamento, coesione, separazione.

Ad oggi, i paradigmi di riferimento condivisi dai differenti settori produttivi hanno privilegiato in modo esclusivo uno di questi vettori/attributi: alcuni di questi, orientati all'applicazione di sofisticati materiali adattabili, hanno rivelato scarsi gradi di libertà nonché assenza di comunicazione (come nel caso del *Bombyx Mori*), altri, hanno privilegiato l'assemblaggio di elementari blocchi da costruzione o componenti prefabbricate in modo cooperativo con elevati livelli di comunicazione reciproca tra i nodi di produzione (il caso delle termiti). E' dunque evidente come l'intero spazio delle possibilità produttive debba essere ancora esplorato: a tal fine, serve uno sforzo utile a compromettere i due approcci, combinando capacità elevate di comunicazione tra piattaforme robotizzate con alti livelli di modulabilità dei materiali.

Questa ricerca guarda alle possibili intersezioni tra metodi di progettazione basati su algoritmi multi-agente⁶ e fabbricazione robotica. L'integrazione tra questi aspetti pone le basi per nuove possibilità tettoniche/formali oltre a ridefinire le connessioni tra sperimentazione tecnica e design.

THEORETICAL FRAME- WORK



La risalita di bolle di vapore nell'acqua bollente mostrano alcune caratteristiche tipiche dell'*emergenza* (un ampio numero di componenti semplici – molecole d'acqua – ed energia nella forma di calore fornito dall'ambiente). Nonostante sia possibile predire l'esatta temperatura in cui l'acqua bolirà (100°C a pressione atmosferica standard di 101325 pascal), non è possibile sapere posizione o forma assunte da ciascuna bolla di vapore.

IL PARADOSSO DEL SORITE

Nel tentativo di introdurre il concetto di *Complessità*, John H. Holland ricorre al paradosso del sorite ('*pile of sand*' *conundrum*): dato un mucchio di sabbia, eliminando un granello dal mucchio avremo ancora un mucchio. Eliminiamo poi un altro granello: è ancora un mucchio. Eliminiamo ancora un granello, e poi ancora uno: il mucchio diventerà sempre più piccolo, finché rimarrà un solo granello di sabbia. È ancora un mucchio, quando rimane un solo granello? E se un solo granello non

è un mucchio, allora in quale momento quel mucchio iniziale non è più un mucchio? Il paradosso serve per Holland a dichiarare la difficoltà nel definire con esattezza gli attributi di *complesso* e *complicato*: è piuttosto facile distinguere un'estremo dall'altro, ma esiste uno spazio intermedio in cui la distinzione diventa vaga e arbitraria.

Per questo motivo, espressioni complesse come la vita e la coscienza, mancano di una definizione rigorosa. Ciononostante, è possibile avanzare un metodo comunque rigoroso circa la materia in questione. Il concetto di *Emergence* ('il tutto è più della somma delle parti') è utile a distinguere sistemi complessi da altri sistemi. Nel corso della storia, fisici si sono avvicinati al tema della complessità a causa di un certo interesse per proprietà emergenti di aggregati di elementi identici, come ad esempio l'umidità di un aggregato di molecole d'acqua. Non c'è una ragione chiara per stabilire che l'umidità è attributo delle molecole individuali; l'umidità è piuttosto una proprietà emergente dell'insieme. In questo, l'umidità si distingue da una proprietà come il peso: il peso di un aggregato è in questo caso la sola sommatoria dei pesi delle parti costituenti.

EMERGENCE

Le proprietà *emergenti* mancano allo stesso modo di precise definizioni. Tra le molteplici rintracciabili, quella su cui ci concentreremo pone attenzione alle interazioni che permettono ad un aggregato il manifestarsi di proprietà irraggiungibili tramite mera sommatoria. In termini matematici, questo tipo di interazioni sono dette *non-linear*: secondo Simon, sono interazioni capaci di produrre livelli di organizzazione e gerarchie (aggregati selezionati ad un livello divengono 'blocchi da costruzione' per proprietà emergenti ad un livello più alto, come nel caso delle molecole di H_2O per l'acqua).

L'organizzazione gerarchica è dunque un aspetto intimamente connesso al concetto di *Emergence*. Ciascun livello gerarchico è solitamente governato da proprie leggi di funzionamento o regole. Ad esempio le leggi della tavola periodica governano la combinazione tra idrogeno e ossigeno, permettendo l'esistenza delle molecole di H_2O , mentre le leggi della fluidodinamica (come le equazioni di Navier-Stokes) regolano il comportamento dell'acqua. Le leggi che governano un nuovo livello non devono violare quelle di un livello precedente- cioè, le leggi di livello inferiore vincolano quelle dei livelli superiori. Riformulato per i sistemi complessi: le proprietà emergenti a qualunque livello devono essere coerenti con le interazioni specificate al livello/ai livelli inferiore/i. Nonostante questi vincoli, possono esserci situazioni per le quali l'emergenza è discutibile.

Trattando l'organizzazione gerarchica come condizione *sine qua non* per la complessità, è possibile concentrarsi sulle interazioni delle proprietà emergenti alle varie scale o livelli.

Come già detto, il *comportamento emergente* è ulteriore requisito essenziale per poter definire un sistema 'complesso'. Alcuni comportamenti emergenti si basano su interazioni dirette ed istantanee tra gli individui del sistema. Gli stormi di uccelli, i banchi di pesci ¹ o gli uragani ² sono esempi di fenomeni definiti da dinamiche che si svolgono in tempo reale, privi di una struttura persistente. La maggior parte delle manifestazioni emergenti è mediata da tracce persistenti che sono rilasciate nell'ambiente esterno. Quest'ultimo tipo di fenomeno – che verrà discusso nel paragrafo successivo – prende il nome di *Stigmergia*. Le dune di sabbia ³ e i termitai ⁴ sono strutture fisiche persistenti – dunque strutture *stigmergiche* – che organizzano il comportamento delle entità che la hanno prodotte. Anche in Internet sono rintracciabili sistemi stigmergici, basati questa volta su strutture persistenti come database, wiki e blog. Gli esempi di sistemi emergenti illustrati nelle immagini seguenti rendono conto delle tipologie di feedback tra elementi individuali di sistemi naturali che originano comportamento sorprendentemente ordinato. Si nota inoltre la chiara negoziazione che si ha tra il numero di elementi costituenti il sistema emergente e la complessità delle rispettive interazioni tra individui: maggiore è la complessità delle interazioni tra elementi, in genere sarà il numero di questi richiesti per l'emersione di un fenomeno di livello più alto. Gli uragani e le dune sono difatti costituite da una vastità di elementi semplici, mentre anche piccoli gruppi di uccelli possono dare luogo a fenomeni di volo in stormo.



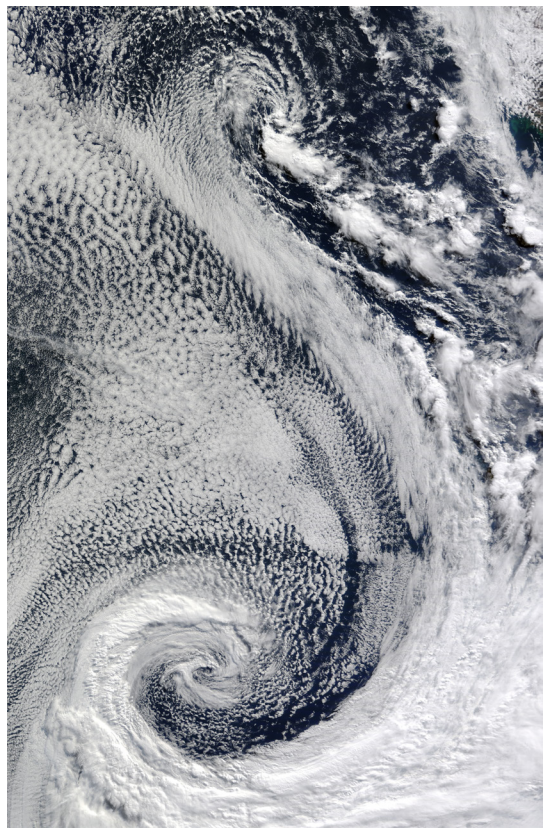
- 1 / In un gruppo di pesci, il comportamento di banco emerge dal desiderio di ciascun individuo di evitare collisioni mentre si trova nelle vicinanze di un suo simile. Feedback positivi sono conseguenza dell'influenza mutua che il comportamento di ciascun pesce ha nei confronti dei vicini. Craig Reynolds, con il suo software di intelligenza artificiale Boids, ha simulato in ambiente digitale comportamenti simili. I banchi di pesci, come gli stormi di uccelli sono raggruppamenti di migliaia di individui. Il più numeroso stormo – stimato costituito di 5000 individui – è in ogni caso poca cosa se confrontato al numero di elementi – di diversi ordini di grandezza superiore – coinvolti nell'organizzazione di altri fenomeni emergenti: ci vogliono bilioni di granelli per realizzare un millimetro della cresta di una duna, ma pure tutti i granelli del Sahara sono nulla in confronto al numero di molecole coinvolte in un uragano. Eppure la natura dell'interazione che si stabilisce tra due soli individui in uno stormo è di gran lunga più complessa rispetto quella che riguarda due granelli di sabbia o due molecole d'aria.

2 / Gli uragani emergono da mutui feedback positivi che si stabiliscono tra flussi dei venti, gradienti di umidità, fenomeni di evaporazione delle superfici oceaniche sufficientemente calde e l'effetto Coriolis: materializzano la negoziazione tra i numerosi elementi coinvolti nel sistema emergente e la complessità delle interazioni che individualmente stabiliscono.

Due fenomeni, collegati tra loro in un ciclo di retroazione, mantengono il livello di energia che permette l'accelerazione dei flussi di aria che organizzano l'uragano. Il primo, lega l'intensità dell'evaporazione alla velocità dei venti spiranti sulla superficie dell'acqua e alla sua temperatura: tanto più alte sono le temperature e veloci sono i venti, quanto maggiore è l'evaporazione di acqua che viene catturata dai venti. Il secondo fenomeno riguarda il raffreddamento crescente che l'aria umida subisce: il vapore acqueo condensa rilasciando il calore che era stato necessario nella prima fase di evaporazione. In questo modo l'aria circostante si riscalda e sale verso l'alto rapidamente. La corrente ascensionale attira ulteriore aria umida dal basso che a sua volta condensa alimentando sempre più il ciclo di feedback positivo.

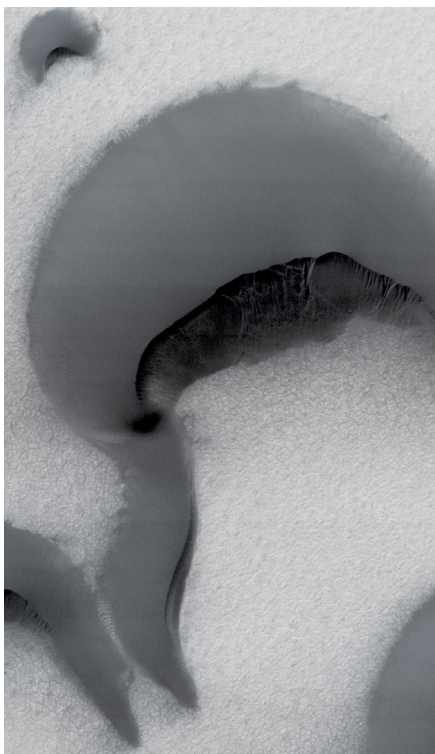
I processi di evaporazione/condensazione non inducono necessariamente uragani. Gli stessi processi, a scale più ridotte, alimentano i temporali. Perché un uragano diventi tale, anzitutto, lo schema con cui spirano i venti si deve organizzare nella ben nota spirale. Il vento a spirale permette l'accumulo di energia concentrando il calore distribuito su una ampia regione di oceano in una area centrale, da cui i venti più intensi possano originarsi.

L'organizzazione spiraliforme è dovuta alle forze di Coriolis che, nell'emisfero nord, forzano le correnti di risalita a muoversi secondo spirali antiorarie. L'effetto di Coriolis è piuttosto debole. Impiega diversi giorni – alle condizioni ottimali – e diverse migliaia di miglia quadrate di oceano per dare luogo ad una spirale ben organizzata, che altrimenti si trasforma in un paio di temporali tropicali.



I sistemi complessi manifestano comportamenti rivelatori di varia natura:

- *auto-organizzazione* in pattern, come nel caso degli stormi di uccelli o dei banchi di pesci;
- *comportamento caotico* dove piccoli cambiamenti nelle condizioni iniziali ('il battito d'ali di una farfalla in Brasile') produce grandi cambiamenti a lungo termine ('un uragano nel Texas');
- *comportamento a 'coda-grassa'*, dove eventi rari (ad esempio estinzioni di massa e crolli di mercato) accadono molto più spesso di quanto predetto da una distribuzione normale (curva a campana);
- *interazione adattativa*, per cui agenti che interagiscono tra loro (come nei mercati o nel caso del dilemma del prigioniero) modificano le rispettive strategie in modo diverso man mano che accumulano esperienza.



3 / Le dune sabbiose sono l'esito di cicli di feedback tra i venti prevalenti che sollevano la sabbia sulla superficie e l'effetto che una cresta della superficie sabbiosa induce sul flusso del vento che le spira contro. Quando la superficie della sabbia è piatta, i granelli di sabbia portati dal vento atterrano senza manifestare alcun pattern specifico. Una qualunque barriera al libero fluire del vento – una roccia, una recinzione esposta, persino un formicaio – produce zone di preferenza di atterraggio per la sabbia, la cosiddetta “wind shadow” al riparo dell'ostacolo. Questa sabbia depositata diviene parte stessa dell'ostacolo al flusso del vento il quale, a sua volta, raccoglie ancora più sabbia al riparo dietro l'ostacolo.

I forti venti che spirano sui litorali sabbiosi producono piccole creste. Le grandi dune richiedono grandi distese di sabbia come ad esempio la Death Valley in California, le dune Huacachina delle coste del Perù, o il “quarto vuoto” – Rub' al-Khālī che ricopre il terzo più meridionale della Penisola araba.

L'aspetto formale assunto dalle dune è anzitutto definito dalla direzione dei venti prevalenti. Quando queste sono pressoché costanti, le creste tendono ad organizzarsi in righe. Al contrario, in presenza di venti irregolari, i pattern generati dalle creste aumentano in complessità come nel caso delle dune “a stella”. Le dune di sabbia emergono ad una scala intermedia tra quella propria degli uragani e quella degli stormi di uccelli. Il tipo di interazione tra granelli di sabbia e correnti d'aria è molto più complesso di quello che si instaura tra le numerosissime molecole di acqua ed aria che originano gli uragani. Sono invece interazioni più semplici se confrontate con quelle che stabiliscono gli uccelli all'interno di uno stormo.

4 / I termitai possono apparire come costruzioni frutto di cooperazione “intelligente”. Le intricate ed elaborate gallerie e camini condizionano il flusso dell'aria così da regolare temperatura e umidità all'interno del nido. Tuttavia le singole termiti non hanno idea di come costruire un nido, in maniera analoga agli uccelli che non sanno come guidare uno stormo. In aggiunta, non sanno percepire la forma globale del nido (sono come operaie cieche). La loro unica abilità consiste nel rispondere a tracce chimiche lasciate localmente da altre termiti, rilevare la temperatura/umidità ed i flussi d'aria che sono influenzati dalla forma del nido, il calore prodotto internamente al nido ed altri fenomeni locali. Il comportamento della singola termite condiziona la forma del nido e, di nuovo, la forma del nido condiziona il comportamento della termite.

Con lo svilupparsi degli studi della complessità, il campo si è scisso in due sotto-sistemi che esaminano due diverse tipologie di emergenza: lo studio dei *complex physical systems* (CPS) e quello dei *complex adaptive systems* (CAS).

Lo studio di CPS si concentra su matrici geometriche di elementi (spesso simili a reticoli) in cui le interazioni dipendono esclusivamente sugli effetti propagati dalle aree più prossime. I cellular automata sono CPS: cambiamenti di stato sono determinati da una legge comune a tutte le celle che, individualmente, guardano solo esclusivamente agli stati delle celle vicine. In altri termini, per tutti i CPS, esiste una 'legge universale' ed una geometria (si pensi alla 'gravità' e ad uno spazio tridimensionale, à la Newton). Lo studio dei CPS ha permesso una migliore comprensione di fenomeni fisici come il lavoro di Anderson sulla superconduttività, le equazioni di reazione diffusione di Turing per la formazione di pattern durante la morfogenesi ed il noto 'effetto farfalla' ⁵.



5 / *Effetto farfalla* è una locuzione che racchiude in sé la nozione più tecnica di dipendenza sensibile alle condizioni iniziali, presente nella teoria del Caos. L'idea è che piccole variazioni nelle condizioni iniziali producano grandi variazioni nel comportamento a lungo termine di un sistema.

Gli studi CAS, al contrario, si interessano di elementi che non sono fissi. Gli elementi, detti *agenti*, imparano e si adattano in risposta a interazioni con altri agenti. Il mercato delle materie prime è esemplificativo. Gli agenti che operano acquistando e vendendo adeguano le rispettive strategie al variare delle condizioni di mercato: nel farlo, sono influenzati enormemente da medie aggregate di tipo top-down, come l'indice dei prezzi di mercato. Nel mercato avvengono continui scambi di informazione, nella forma di offerte di acquisto e vendita, ed effetti di ripida discesa come le frequenti 'bolle' e 'crash'. È insolito osservare nei CAS una qualunque forma di convergenza – pur momentanea – verso una singola strategia 'ottima', o verso un equilibrio. Non appena gli agenti si adattano vicendevolmente, ne emergono altri dotati di nuove strategie. Così, ciascun nuovo agente diventa opportunità per ulteriori interazioni, aumentando il grado complessivo di complessità. Questo complesso ciclo di feedback che si instaura rende difficile l'analisi, o anche soltanto la descrizione, dei CAS.

L'analisi di sistemi complessi si riduce spesso nell'attività di ricerca di pattern ricorrenti nelle configurazioni sempre variabili di sistema. Un'analogia utile è fornita dal gioco degli scacchi: una dozzina di regole determina le mosse consentite ad un ristretto numero di pezzi – 32 pezzi suddivisi in 6 generi –, disposti al di sopra di una griglia di 8x8 quadrati. Se, in media, ogni mossa è selezionata tra 10 consentite, ed una partita media dura 50 mosse, ci saranno allora 1050 possibili sequenze ammesse – un numero molto più grande del numero di atomi stimato presenti nell'universo. Ciononostante, in una vera partita, non esistono due partite identiche. Questa *continua novità* prodotta da un numero limitato di regole o leggi è una caratteristica comune alla maggior parte dei sistemi complessi. Esistono tuttavia pattern ricorrenti nel gioco, alcuni dei quali sono tanto frequenti da essere identificati con nomi come 'perno', 'forchetta', 'attacco scoperto', ecc. Sono stati scritti libri interi su come utilizzare questi pattern per guidare e vincere la partita. Allo stesso modo, i sistemi complessi sono soliti esibire schemi ricorrenti che permettono una qualche forma di controllo o 'guida'. Per approfittare di queste possibilità, dunque, l'analisi deve basarsi su metodi di scoperta e utilizzo di pattern ricorrenti nei sistemi generati.

Ci serviamo a questo punto di due concetti presi in prestito dalla fisica: le *leggi* e gli *stati*. Le leggi, come quelle di Newton sulla gravitazione o quelle di Maxwell sull'elettromagnetismo, sono la controparte delle regole degli scacchi. Gli stati, come lo stato dell'economia, corrispondono invece a particolari configurazioni dei pezzi sulla scacchiera. Come negli scacchi, le leggi fissano le modalità secondo cui gli stati possono variare nel tempo.

Nei CPS, le leggi vincolano il modo in cui un dato stato iniziale può modificarsi; consideriamo il caso di Newton, le sequenze degli stati (più rigorosamente, le *traiettorie dello stato*) variano dal moto regolare ellittico dei pianeti fino alla complicata traiettoria di una sonda planetaria. Le leggi dei CPS sono quasi sempre formulate utilizzando *equazioni differenziali alle derivate parziali* (PDE), dove le variabili dell'equazione specificano gli stati (ad es. nelle equazioni di Newton sono posizione, quantità di moto, tempo).

Nei CAS gli elementi sono agenti adattativi, dunque mutevoli con l'adattamento degli agenti. L'analisi di tali sistemi diventa più difficile: in particolare, le interazioni mutevoli tra agenti adattativi non sono più esclusivamente additive. Questa non-linearità esclude l'utilizzo diretto di PDE (essendo queste, come la maggior parte degli sviluppi matematici, fondate sull'ipotesi di additività). La difficoltà è composta: in molte discipline connesse ai CAS, come le scienze sociali, non esiste un linguaggio standard per descrivere – tanto meno per analizzare – l'interazione tra agenti. Per guidare i CAS occorre andare ben oltre l'attività di collezione ed organizzazione di dati per scoprire i meccanismi che li generano: serve un preciso linguaggio che descriva le interazioni adattative di un ampio numero di agenti (come la *grammatica universale* di Noam Chomsky).

STIGMERGIA

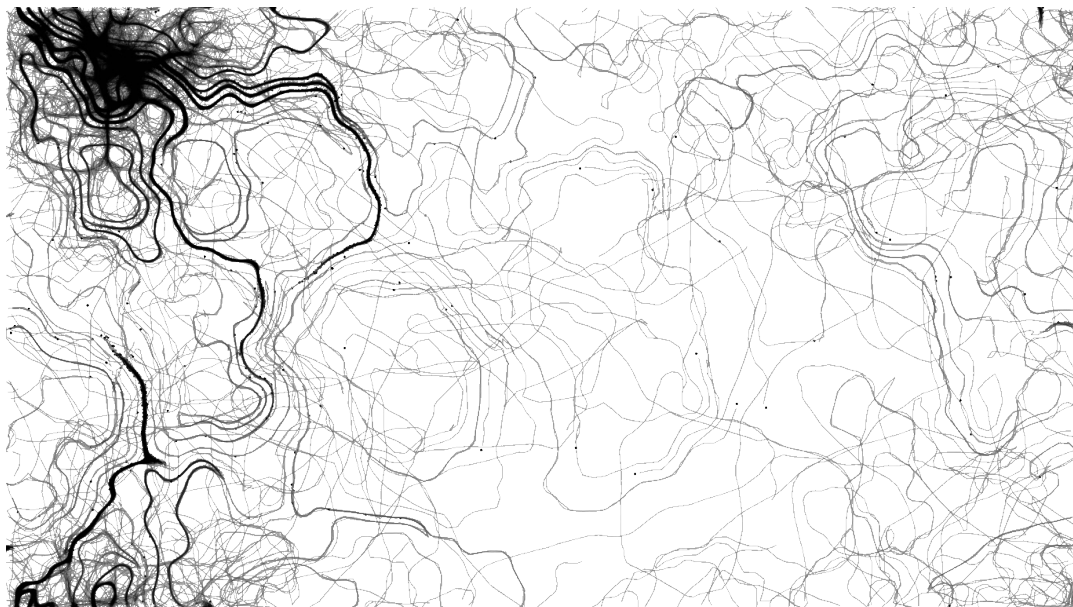
La stigmergia è la chiave che permette l'auto-organizzazione degli organismi multi cellulari. Si ha organizzazione per via stigmergica quando parti individuali del sistema comunicano tra loro indirettamente modificando l'ambiente locale che condividono. I termitai sono uno degli esempi più noti, ma è una modalità comune anche alle cellule nel nostro corpo e ai computer.

[Steve Burbeck]

La cooperazione nei sistemi multicellulari (cellule in corpi multicellulari, insetti sociali in una colonia, persone nelle società, o computer in Internet) presuppone la comunicazione tra i soggetti costitutivi che deve essere INDIRETTA e DISTRIBUITA ⁶. In analogia al gioco degli scacchi, secondo il quale le figure degli scacchi regolano le azioni dei giocatori che interagiscono reciprocamente mutando la posizione dei pezzi stessi sulla scacchiera, è la persistenza nell'ambiente dell'informazione che permette l'organizzazione del comportamento collettivo di cellule, insetti, computer, persone.

Gli esempi di fenomeni stigmergici sono numerosissimi. I citoscheletri delle singole cellule fungono da strutture stigmergiche in grado di organizzare le funzioni cellulari interne. Sono strutture stigmergiche i corpi della maggior parte degli organismi multicellulari: per questi le cellule si strutturano in un *corpo* per accrescimento (forma ed estensione) a partire da una matrice extra-cellulare *non-vivente* prodotta dalle stesse cellule. Questa matrice raccoglie ogni sorta di traccia che le cellule rilasciano sotto forma di molecole messaggere,

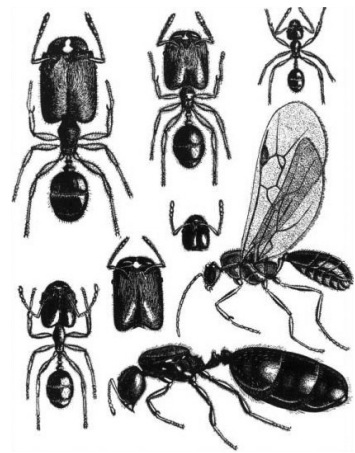
6 / L'emergenza di pattern stigmergici è possibile includendo forme di interazione locale in maniera distribuita entro un sistema multi-agente. L'immagine – ottenuta da codice scritto in Processing – è di Peter Buš.



ottenendo così un fondamentale contributo all'orientamento e differenziazione delle funzioni cellulari. Dipendono da processi stigmergici anche i sistemi che elaborano informazione tramite neuroni, come il nostro cervello, attraverso persistenti modificazioni fisiche sui neuroni e sulle sinapsi. La computazione basa le sue varie forme di memoria su strutture stigmergiche: RAM, ROM, FLASH, disco di file-system o database di grandi dimensioni.

Gli insetti sociali, le cellule, i neuroni ed i computer cooperanti comunicano attraverso *segnali* e *tracce*, dove per *segnale* si intende un evento attivo di comunicazione che avviene in tempo-reale, mentre con *traccia* ci si riferisce ad una informazione annessa alla struttura stigmergica che viene riletta più volte. Sebbene si tratti in entrambi i casi di comunicazione specializzata – nel senso che il significato dei messaggi è dipendente dalle cellule/insetti/computers diversamente specializzati che li ricevono⁷ –, le tracce posseggono un grado di specificità ulteriore, trattandosi di informazioni localizzate che definiscono significati in base alla posizione che occupano entro la struttura stigmergica. La figura del pedone nel gioco degli scacchi fornisce un elemento strategico in base alla riquadro sulla scacchiera occupato.

Sono le tracce, non i segnali, che forniscono idoneo supporto ad una più complessa comunicazione, quindi ad una organizzazione sociale complessa. Ne sono riprova tanto le colonie di insetti sociali quanto gli organismi multicellulari. Nel caso dei sistemi ossei, qualora si verificano particolari sollecitazioni, si attuano processi di formazione di tracce percepibili da cellule di varia natura, tra cui gli osteociti, che opereranno così una ridefinizione costante della struttura resistente. Nel caso di tessuti muscolari lisci sono invece le cellule delle pareti dei vasi sanguigni che modulano i movimenti contrattili sulla base delle tracce rilevate nella matrice extra-cellulare. E' lecito dunque affermare che la comunicazione negli organismi multicellulari semplici avvenga primariamente tramite segnali; viceversa, in quelli più complessi, viene stabilita una comunicazione basata principalmente su tracce.

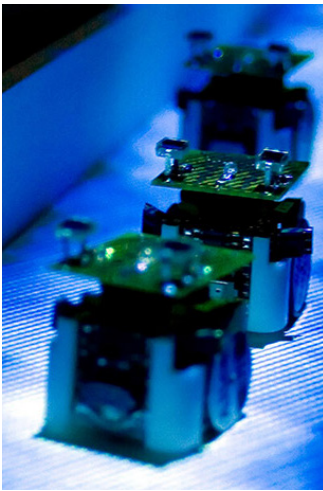


7 / Anche gli insetti sociali utilizzano strategie di comunicazione polimorfa propria delle cellule. Formiche e termiti, ad esempio, comunicano tra di loro diffondendo feromoni per organizzare i comportamenti specializzati di lavoratrici, combattenti, re e regine. Formiche diversamente specializzate rispondono in modo differenziato a questi marcatori chimici. In altri termini, rispondono in maniera polimorfa in funzione del proprio ruolo entro la colonia. E' interessante notare come questo comportamento sia adottato da specie ben più complesse degli insetti sociali. I feromoni, una sorta di messaggi in forma molecolare che vengono diffusi nell'ambiente per poi esser riassorbiti da altri, rivestono un ruolo importante nel comportamento sociale di molte altre specie, umana compresa.

INTELLIGENZA E ROBOTICA DI SCIAME

L'intelligenza di sciame opera per mezzo dell'interazione locale di agenti autonomi che fanno emergere un comportamento collettivo in sistemi auto-organizzanti decentralizzati. Il termine *Swarm Intelligence* fu introdotto nel 1989 da Gerardo Beni, Susan Hackwood e Jing Wang per descrivere sistemi cellulari robotizzati, ma è poi evoluto identificando in modo più generico il comportamento collettivo che emerge a varie scale in strutture biologiche, computazionali e sociali. Le immagini cui ci si riferisce – che hanno così tipizzato questo genere di interazione – si rifanno di nuovo a stormi di uccelli, interazioni tra insetti sociali, processi di crescita batterica e fluttuazioni di banchi di pesci.

La comprensione in termini computazionali di questi sistemi si deve in larga misura al personaggio di Craig Reynolds che, durante la metà degli anni '80, ha sviluppato simulazioni di modelli comportamentali in grado di produrre strutture formali complesse: per queste formazioni, l'insieme visto come un tutto manifesta un livello di ordine superiore alla somma delle sue parti costitutive. Aspetto ancora più interessante sono gli effetti che si generano: i sistemi all'opera sembrano muoversi come un singolo organismo, pulsanti, in costante ridefinizione, turbolenti ma coesi.



Se dunque abbiamo definito la *Swarm Intelligence* come una caratteristica dei sistemi naturali e artificiali composti da un gran numero di agenti che coordinano le loro attività in modo distribuito e utilizzando esclusivamente informazione locale, la *Swarm Robotics* si configura come la disciplina che si occupa del design, della costruzione e del controllo di sistemi robotici che seguono i principi della *Swarm Intelligence*⁸.

Perché allora costruire sistemi robotici di sciame⁹? L'approccio di norma più seguito in robotica è quello di avere un robot che risolve il problema che gli è posto. Lavorando con sistemi di molte unità, si ricercano una serie di caratteristiche desiderabili:

8 / *Intelligenza di sciame e robotica*, Conferenza del 30 Ottobre 2011 tenuta da Marco Dorigo durante il Festival della Scienza, Torino.

9 / I ricercatori stanno scoprendo giorno dopo giorno le grandi abilità di sciame robot simili a formiche nel farsi strada tra reti, pur in assenza di forme sofisticate di intelligenza. Questi robot sono stati chiamati *Alice*, da intendersi sia in senso collettivo che come nome proprio di ciascun individuo. Il comportamento di riferimento è quello delle formiche Argentine: come queste, le unità robot sono dotate di un primitivo apparato sensoriale, una coppia di sensori di luminosità. I piccoli robot vengono fatti gironzolare in un semplice labirinto, alla ricerca di un obiettivo con il minor numero di sterzate possibili.

parallelismo/ divisione del lavoro – robot differenti possono eseguire compiti differenti simultaneamente, allocando la loro capacità lavorativa ai diversi compiti in modo adattativo, cioè a seconda di che cosa è richiesto;

scalabilità – si potrebbe aumentare la quantità di prodotto aumentando il numero di robot del sistema;

tolleranza ai guasti – quando un robot si rompe un altro può sostituirlo. Ci sono situazioni in cui è importante che il sistema continui a funzionare. Trattandosi di un controllo dei robot secondo un approccio distribuito non si avrà un *single point-of-failure*;

costo – robot 'semplici' sono meno costosi da costruire.

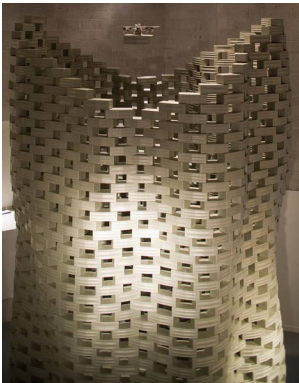
A seguire, vengono presentati alcuni tra i più noti e recenti sviluppi teorico–applicativi che fanno significativo uso di tecnologie robotica 'di sciame'.

10 / *Flight Assembled Architecture*, di Gramazio & Kohler e Raffaello d'Andrea

Nel 2011, lo studio Gramazio & Kohler e Raffello D'Andrea sono pionieri nella sperimentazione di processi di formazione materiale dinamica e di comportamento guidato da macchine. Parte costitutiva di una generazione di giovani architetti in cerca di utilizzare il pieno potenziale della progettazione e fabbricazione digitali, Gramazio & Kohler si uniscono a Raffaello D'Andrea, avanguardia della progettazione di sistemi autonomi e delle relative strutture algoritmiche. Insieme, hanno cominciato ad esplorare le possibilità di un rivoluzionario apparato di montaggio, mostrando nuove possibilità di articolazione spaziale e strutturale che si basa sulla proposta di *Flight Assembled Architecture*. Concepita come una struttura architettonica (un 'villaggio verticale' alto 600 m), l'installazione esibita al Frac Centre di Orléans offre originali spunti di riflessione sulla natura dinamica del processo di formazione che materializza l'architettura.



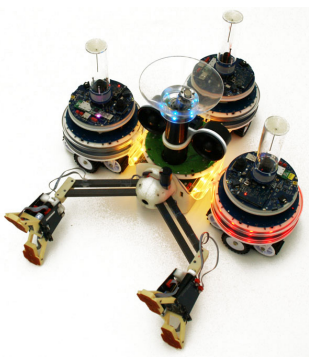
Gramazio & Kohler insieme a Raffaello D'Andrea hanno sviluppato una potente espressione di una innovazione radicale che si serve di una moltitudine di agenti mobili in grado di lavorare in parallelo, agendo nell'insieme come uno strumento di produzione scalabile. Questi agenti robot sono programmati per interagire, sollevare, trasportare ed assemblare piccoli moduli, realizzando la costruzione di una struttura che sintetizza un rigoroso approccio architettonico ed un visionario sistema autonomo.



11 / *Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms*,
Marco Dorigo (Project Leader)

Col progetto *Swarmanoid* viene proposta una nuova modalità di costruire robot che agiscono efficacemente e adattandosi entro un ambiente modificato dall'uomo e tridimensionale. Da un punto di vista scientifico, l'obiettivo principale è l'implementazione ed il controllo di un nuovo sistema distribuito di robot costituito da diverse tipologie di piccole unità autonome che si connettono in modo dinamico, formando quello che è chiamato appunto *Swarmanoide*.

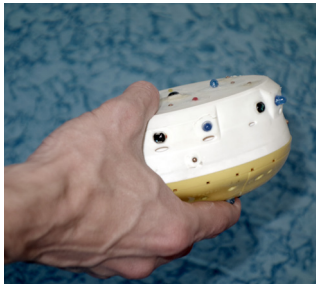
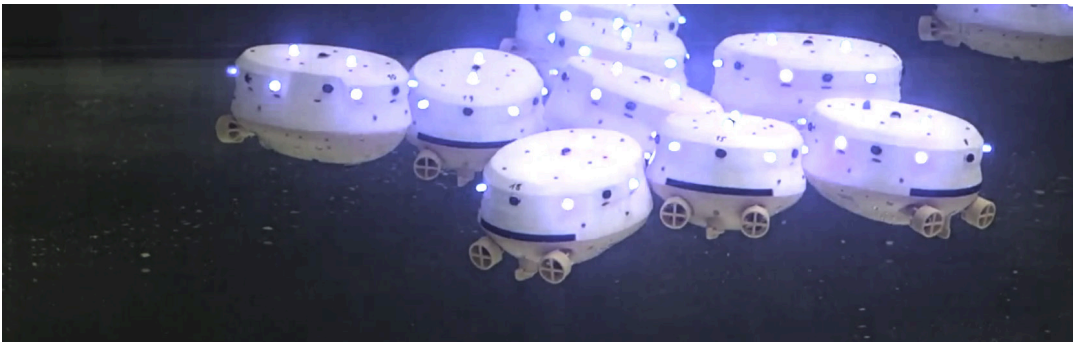
Lo *Swarmanoid* è un super-organismo formato da 60 unità robot scelte tra tre possibili tipologie: *eye-bot*, *hand-bot*, *foot-bot* (occhio, mano, piede).



Gli *eye-bots* sono specializzati nella percezione ed analisi dell'ambiente che visionano dall'alto (volano o sono agganciati al soffitto) così da fornire indicazioni utili alle altre due tipologie (che lavorano invece a terra). Gli *hand-bots* sono specializzati nell'operatività in spazi prossimi a quelli occupati dai *foot-bots* e controllati dagli *eye-bots*. Possono arrampicare superfici verticali, pareti ed oggetti presenti nell'ambiente. I *foot-bots* sono infine specializzati nella motilità via terra (anche in condizioni accidentate) e nel trasporto di oggetti o di altri robot.

12 / CoCoRo – Collective Cognitive Robots , Thomas Schmickl (Project Leader)

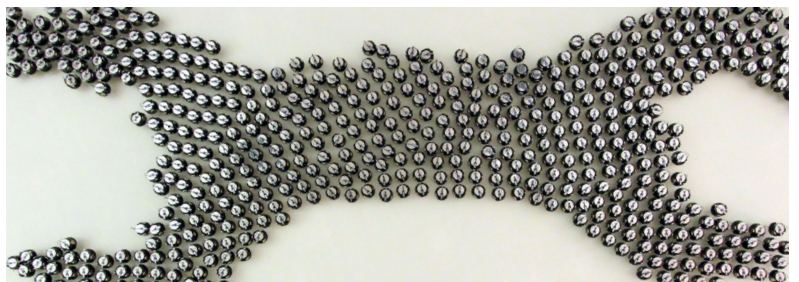
Il progetto CoCoRo indaga le forme cognitive possedute da uno sciame di robot subacquei (AUV – autonomous underwater vehicle) interagenti e in grado di ripartire sul gruppo il compito assegnato. Sono individuati come possibili obiettivi per lo sciame CoCoRo: attività di monitoraggio ambientale, ricerca, manutenzione, esplorazione e raccolta di risorse in ambiente sottomarino. Lo sviluppo di un sistema distribuito ed incorporato di AUV permette l'esplorazione del potenziale associato a software capace di generare cognizione, supportato da un idoneo apparato hardware. La scelta di uno scenario marino pone nuove sfide che rimangono in robotica tuttora irrisolte. La difficoltà di accesso diretto a certe profondità richiede un



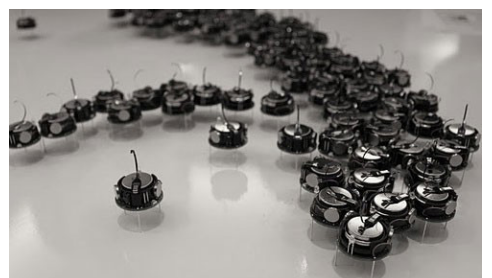
elevato grado di autonomia degli agenti. L'ambiente complesso e non prevedibile va supportato da una particolare flessibilità del sistema, mentre la motilità tridimensionale dell'AUV stimola nuovi principi di ingegneria e approcci al controllo dei robot. Anche in questo caso, le capacità di cognizione rilevabili nei sistemi biologici sono state applicate per la prima volta in attività subacquee.

13 / *The KILOBOT Project – A Thousand (2^{10}) Robot Swarm for Programmable Collective Behaviors*,
Self-Organizing Systems Research Group, Harvard University

Lo sciame dei *Kilobot* è costituito da mille unità robot, progettate per la ricerca e sperimentazione di comportamenti collettivi negli sciame di robot autonomi su vasta scala. I ricercatori del Self-Organizing Systems Research Group di Harvard hanno dotato ciascun individuo delle capacità basilari richieste per uno sciame di robot autonomi (controllore programmabile, un sistema di locomozione elementare e comunicazione locale), e lo hanno fatto utilizzando componenti a basso costo che sono prevalentemente assemblati da un processo automatizzato. Allo stato attuale, molti algoritmi e metodi di controllo sono stati proposti in robotica per gruppi di unità decentralizzate cooperanti.



Questi algoritmi sono pensati per il controllo di gruppi numerosi di robot. Tuttavia, per ragioni di costo, tempo o complessità, sono adottati in ambienti simulati, o in sperimentati un esiguo numero di robot. Kilobot permette dunque di apprezzare gli effetti di scalabilità grazie ad un semplice sistema di progettazione che opera (riprogrammazione, accensione, ricarica) sull'intera popolazione di agenti robot simultaneamente.

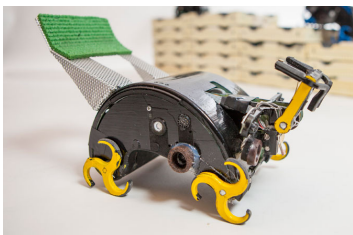
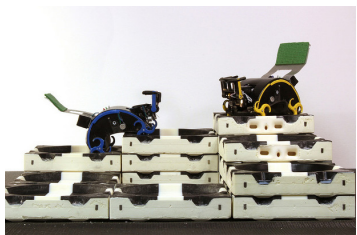


14 / *The TERMES Project – Collective construction of 3D structure by termite-inspired climbing robots, Self-Organizing Systems Research Group , Harvard University*

Ispirati dalla capacità esibita dalle termiti nel realizzare le proprie costruzioni, l'obiettivo di del progetto *TERMES* è lo sviluppo di un sistema-sciame di robot in grado di cooperare alla costruzione di strutture tridimensionali che, come nel caso delle termiti, superino di diversi ordini la dimensione degli individui che le realizzano.

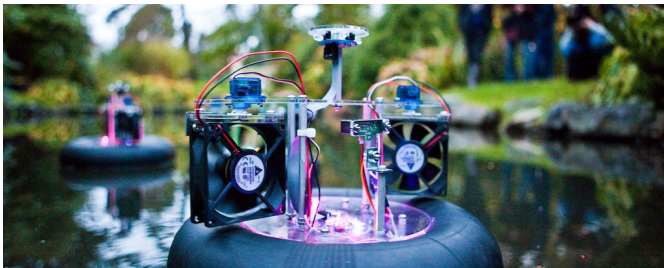
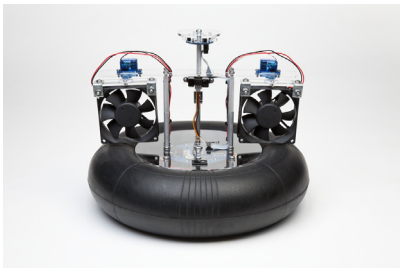
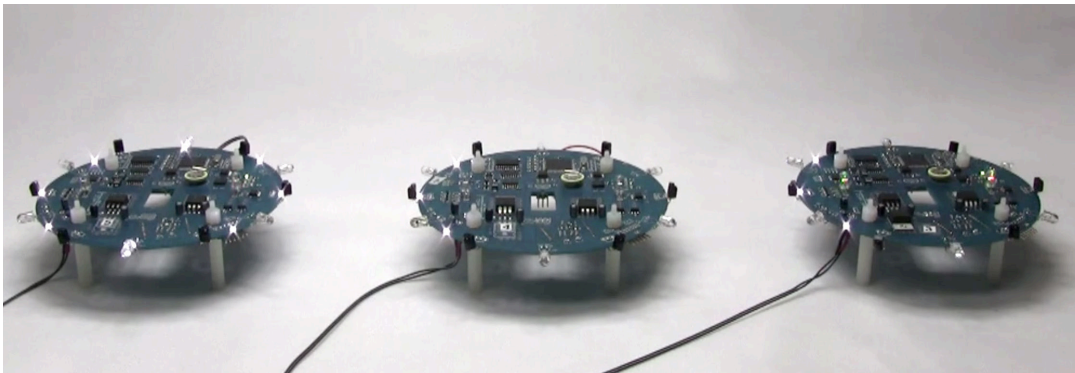


Il set-up hardware è costituito da robot semplici ma autonomi e da blocchi specializzati che fungono da materiale da costruzione: il robot è capace di manipolare i blocchi per crescere la costruzione in verticale, ma se ne serve anche per arrampicarsi durante il processo di costruzione. Il controllo multi-robot permette a diverse unità di cooperare in modo distribuito e parallelo all'assemblaggio di una struttura specificata da utente.



15 / *Vessels / aquatic robotic installation*, Sohan Audry, Stephen Kelly, Samuel St-Aubin

Vessels è una installazione che utilizza robot acquatici autonomi. Una popolazione di circa 50 unità interagisce con l'ambiente circostante formando un ecosistema semplificato. Il comportamento emergente di questi robot ricorda le interazioni sociali che si stabiliscono tra creature viventi. Chi osserva questo fenomeno può stabilire una relazione empatica nei confronti dei comportamenti esibiti dai robot, può interpretarli addirittura come atti intenzionali o giustificati da particolari motivazioni.



E' anche possibile stabilire delle connessioni tra la dinamica dei gruppi e proprietà invisibili del milieu da cui provengono. Muovendosi sul pelo dell'acqua, ciascun robot colleziona ed interpreta dati inerenti condizioni ambientali come la qualità dell'aria, temeperatura, luce ambientale, inquinamento acustico... Dal momento che ciascuna unità è dotata al più di un paio di sensori, la piena conoscenza dello stato ambientale dipende dalla comunicazione che si stabilisce tra il gruppo che si scambia informazioni. Anche i comportamenti sono influenzati dal rilevamento di certe condizioni, per cui si possono esibire, ad esempio, manifestazioni di aggressività nei movimenti irrazionali di alcuni robot. Questo cambio di comportamento influenzerà i vicini e così via si propagherà un effetto di azione e reazione.

AGENCY

La formulazione del concetto di *materia agente* (*agency of matter*) permessa dalla comprensione della logica di sciame, pone la necessità di ricollocare l'intenzione progettuale alla scala locale. Le metodologie di progettazione basate su sciame lavorano incorporando semplici decisioni di carattere architettonico negli agenti costituenti il sistema distribuito di entità autonome dotate di capacità computazionali. L'interazione degli agenti e le loro decisioni permettono l'auto-organizzazione dell'intenzione di progetto: si crea in tal modo una forma di intelligenza collettiva o comportamento emergente ad una scala globale. Le ragioni che spingono l'indagine attraverso queste metodologie risiedono negli effetti risultanti e nella capacità di risolvere complessi problemi progettuali grazie alla generazione di ordine emergente. Rispetto altri approcci generativi, si procede valutando primariamente la scala delle interazioni locali, non i risultati che le iterazioni producono – valutazione che ha comunque un valore esplorativo all'interno della progettazione *swarm-based*, ma che in questo caso specifico vuole distinguersi per marcare uno spostamento della progettazione da pura esplorazione a diretta codifica di intenzione. E' dunque proprio questa operatività emergente che rende il design multi-agente un potente strumento con cui risolvere problemi complessi come l'organizzazione di programma e struttura.

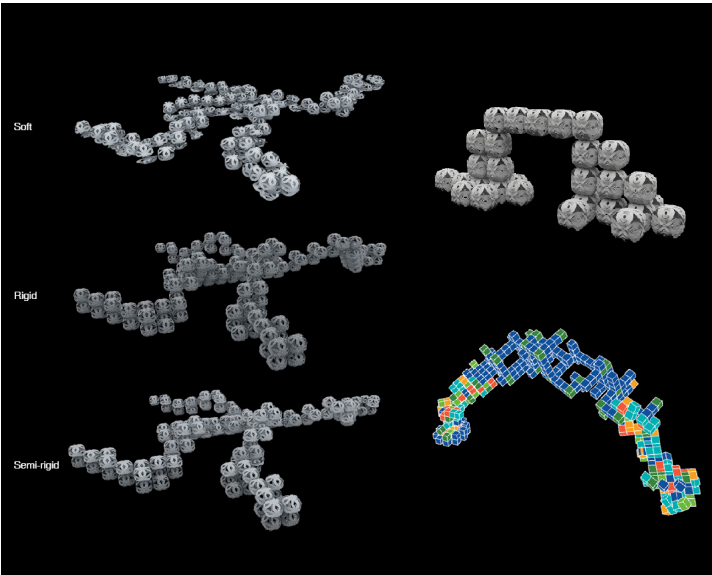
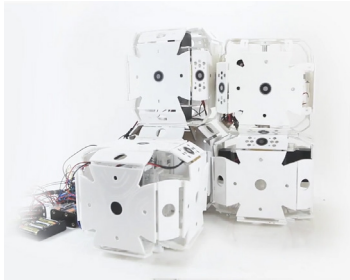
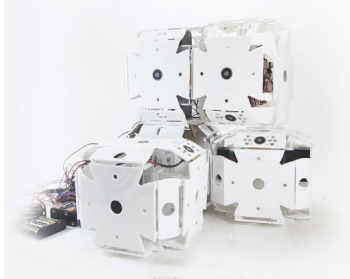
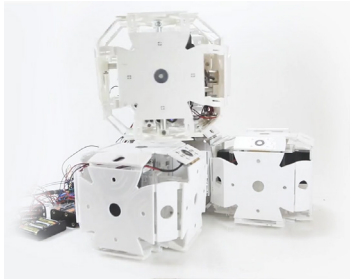
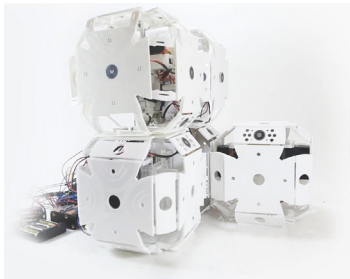
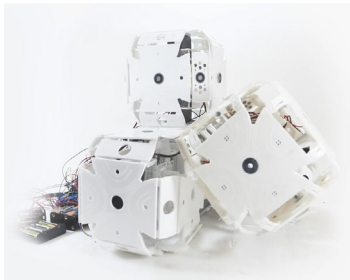
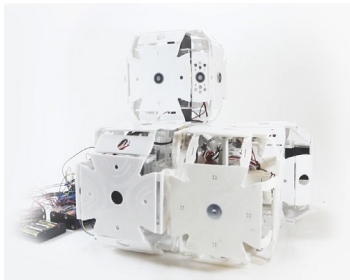
Secondo Roland Snooks “è possibile individuare due distinti meccanismi coi quali l'agente opera nel processo progettuale: l'agency della materia architettonica e l'agency che organizza o ridefinisce la struttura della materia architettonica”¹⁶.

Per cogliere questa distinzione è ancora una volta utile riferirsi all'analogia biologica del comportamento di insetti sociali. La cooperazione che si instaura tra formiche nella formazione di catene o ponti esemplifica la modalità con cui un agente opera *in quanto* materia architettonica (o strutturale)¹⁷.

16 / “Behavioral Matter – Pulsations of the Swarm” di Roland Snooks, in “Pulsation in Architecture” di Eric Goldemberg, 2012

17 / *Hyper Cell*, progetto di Pavlina Vardoulaki, Cosku Cinkilic, Houzhe Xu, Ahmed Moshen Shokir – AADRLL Spyropoulos Design Lab. Il progetto si

fonda sulla capacità di ogni elemento del sistema di auto-organizzazione, mobilità e riconfigurazione mediando le richieste strutturali che sono espresse dagli elementi adiacenti.

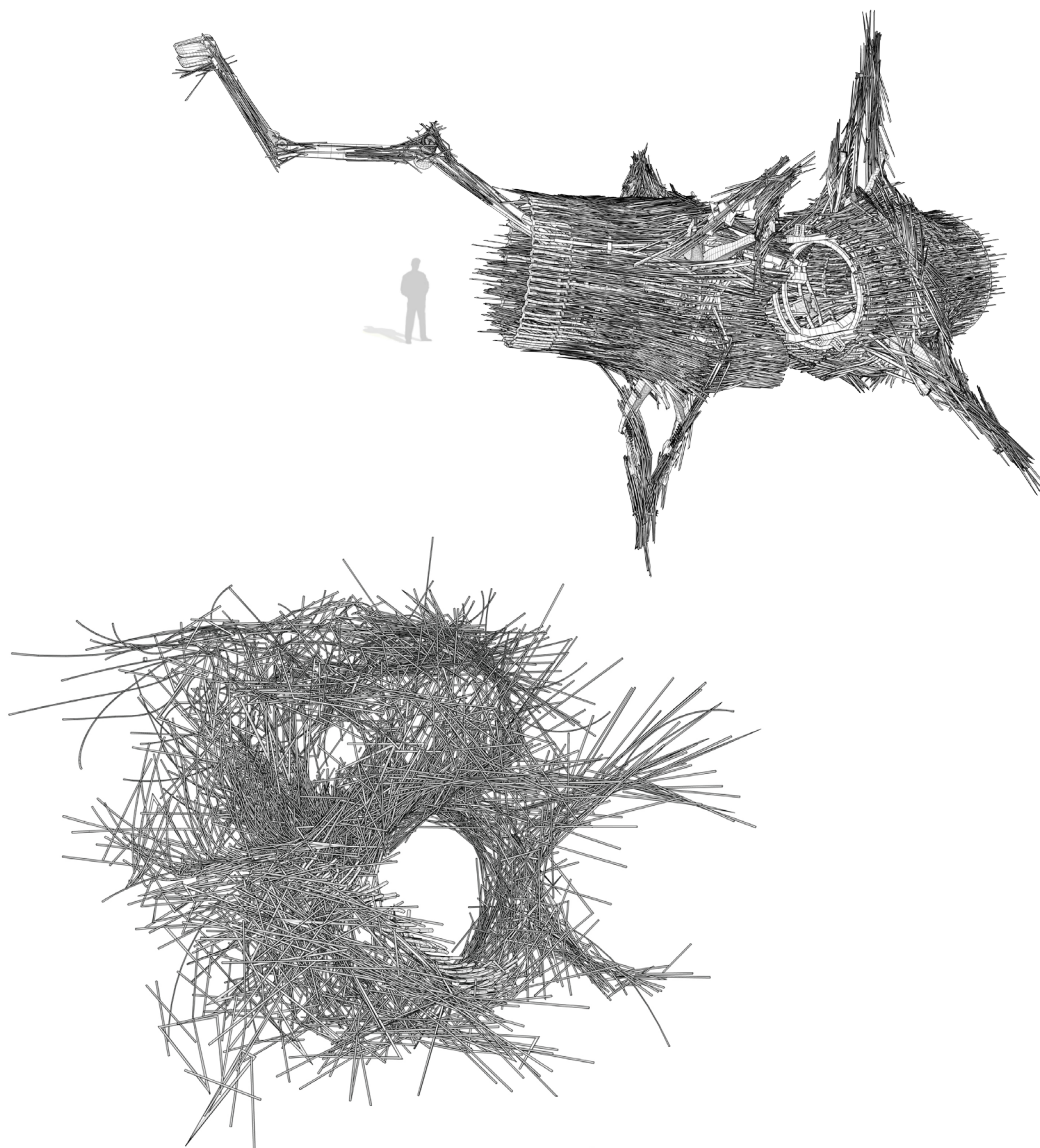


La formazione delle torri termitaio –al contrario– richiedono la riorganizzazione di materia ad opera delle termiti tramite un insieme di regole bottom-up che stabiliscono una relazione tra materiale fangoso, tracce feromoniche e l'interazione tra la popolazione di termiti. Questa modalità esemplifica una relazione stigmergica per la quale l'agente *riorganizza* materia architettonica¹⁸.

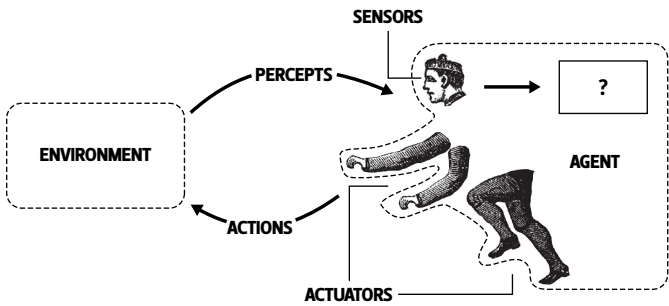
La proposizione di simili sistemi emergenti multi-agente in ambito progettuale-architettonico non deve generare fraintendimenti circa il loro fine ultimo. Non si vuole simulare in alcun modo l'attività umana o la sua occupazione, né predirne future evoluzioni: è piuttosto sollecitata una nuova interpretazione dell'attività progettuale come atto basato su comportamento – comportamento specifico dell'architettura.

18 / *Wire>Desire*, progetto di Adam Orlinsky, (n)certainties – Die Angewandte – Fall 2008, Studio Roche/Fornes.

Questo apparato meccanico ricicla scarti derivanti da impianti produttivi di metalli e demolizioni: cumuli informi di questi scarti vengono deformati generando primitive morfologie.



Dal punto di vista proprio dell'Intelligenza Artificiale (AI), un agente è un oggetto – che si tratti di programma di intelligenza artificiale oppure di un robot– che percepisce e agisce. L'ipotesi, implicita in questa definizione, attribuisce un ruolo attivo agli agenti che dunque non subiscono passivamente l'ambiente in cui si trovano, ma producono azioni che ne modificano le caratteristiche. Spesso, nel considerare le azioni di questi agenti, si parla dei concetti di Autonomia e Razionalità ¹⁹.



19 / L'Autonomia è una caratteristica propria dell'agente che opera senza la guida o la direzione di alcun essere umano. Per Razionalità si intende una proprietà delle azioni che non specifica il processo con cui le stesse azioni vengono selezionate.

Un agente percepisce e modifica un ambiente –virtuale o reale. L'AI si occupa di progettare il *programma agente*, una funzione in grado di implementare la mappatura dell'agente dalle percezioni alle azioni. Tale programma viene eseguito su qualche specie di dispositivo capace di computazione cui ci si riferisce col termine *architettura*: potrebbe trattarsi di un semplice computer, eventualmente integrato con dell'hardware specifico per uno scopo, o utili dispositivi di input come attrezzatura audio o video. L'architettura, in questo senso, rende possibile la percezione al programma per mezzo di sensori, esegue il programma, impartisce le azioni agli attuatori decise dal programma. Questa relazione può così riassumersi:

Agente = Architettura + Programma.

Questa generica formulazione sulla costituzione di un Agente va considerata insieme alla distinzione proposta da Forsyth tra programma sequenziale e programma basato su conoscenza (*knowledge-based*) :

Programma Sequenziale = Dati + Algoritmo

Programma Basato su Conoscenza = Conoscenza + Inferenza

Russel e Norvig²⁰ distinguono tre tipologie di agenti: *simple-reflexive*, *goal-based* e *utility-based*. Pur condividendo la medesima struttura basilare, ciascuna ha un diverso livello di complessità interna. In base al grado di intelligenza percepita e alle capacità possedute, si parla di:

1 – *Simple-Reflex Agent* o agenti con riflessi semplici: la connessione tra percezione e azione è affidata a regole di tipo stimolo-risposta (se...allora agisci). Questo tipo di agente opererà correttamente solo sulla base delle sue istantanee percezioni. Una possibile complicazione può aversi qualora i sensori ambientali non rilevino lo stato complessivo dello stesso in un dato istante. Per far fronte a questo problema di natura percettiva, si richiede all'agente il mantenimento di una sorta di stato interno che registri l'input percettivo, al fine di individuare la corretta azione da far seguire. In tali condizioni si parla di *agente riflessivo con stato interno*.

2 – *Goal-based Agent* o agenti basati su obiettivo : conosce lo stato attuale dell'ambiente e gli obiettivi da raggiungere. L'informazione dell'obiettivo descrive le situazioni desiderabili al programma agente. Gli obiettivi semplici possono raggiungersi tramite semplici azioni, mentre obiettivi più complessi possono richiedere una serie di passaggi intermedi. Si tratta di una tipologia sostanzialmente diversa da quella *simple-reflexive*, dal momento che questa tipologia è in grado di effettuare considerazioni sullo stato futuro dell'ambiente conseguente ad un dato agire. Ricerca e Pianificazione sono i due sotto-domini dell'AI che si occupano della ricerca di sequenze-azioni capaci di raggiungere un dato obiettivo. Ne derivano due ulteriori sub-tipologie di agenti: *Problem-Solving Agent* e *Knowledge-based Agent*. Per i primi, gli obiettivi vengono raggiunti grazie a tecniche di ricerca cieca ed euristiche²¹, mentre i secondi – dotati fin dall'origine di parziale conoscenza riguardo il mondo e le proprie azioni – fanno impiego di ragionamento per mantenere una descrizione dell'ambiente con l'incedere degli stimoli cui sono sensibili, infine ne deducono indirizzi operativi utili al raggiungimento degli obiettivi.

3 – *Utility-based Agent* o agenti basati su utilità : gli agenti del tipo goal-based distinguono rigidamente tra stati *obiettivo* e stati *non-obiettivo*. E' possibile misurare 'quanto desiderabile' sia un particolare stato: questa misura si può ricavare attraverso una funzione di utilità che definisca, per ciascun possibile stato, l'utilità associata. Il termine utilità va inteso come il grado di 'oddisfazione' dell'agente. Un agente basato su utilità razionale sceglie l'azione che massimizza l'utilità attesa conseguente dall'attuazione di quella stessa azione. Un agente di questo tipo deve modellare e tracciare il proprio ambiente, compito che ha richiesto ingenti sforzi da parte della ricerca sulla percezione, rappresentazione, ragionamento e apprendimento.

20 / "Artificial Intelligence: A Modern Approach" di S. Russell e P. Norvig (1995)

21 / La ricerca cieca – *blind search* o ricerca *non informata* – fa riferimento a quei metodi di ricerca che non 'vedono' dove stanno andando. Non si tenta in alcun modo di valutare dove si possa trovare l'obiettivo, finché non ci si imbatte in esso. Di conseguenza i metodi ciechi possono impiegare molto tempo a cercare in direzioni totalmente sterili. Questi metodi sono applicabili solo quando lo spazio di ricerca non è molto ampio, mentre la maggior parte dei programmi di AI deve cercare informazioni importanti o soluzioni all'interno di ampie ed intricate reti di conoscenze, stati o condizioni. In tali situazioni diventa essenziale disporre di qualche informazione guida, che indirizzi la ricerca. Un metodo di ricerca informato sfrutta conoscenza specifica sul dominio in esame consentendo di ottenere risultati soddisfacenti anche in problemi di grandi dimensioni. Tale conoscenza è detta euristica e viene usata per guidare la ricerca selezionando prima (o solamente) i cammini più promettenti. Un'euristica è un criterio, un metodo, per decidere, tra diverse azioni alternative, qual'è quella che promette di raggiungere più efficacemente un determinato obiettivo. Un'euristica è una tecnica che migliora il processo di ricerca di soluzioni, eventualmente sacrificando la possibilità di considerare tutte le soluzioni (completezza della ricerca) o la ottimalità della soluzione trovata. Le tecniche euristiche, infatti, operano una negoziazione tra le caratteristiche di ottimalità, completezza, accuratezza o precisione della soluzione e la rapidità di ottenimento della stessa.

PATTERN FORMATION

I meccanismi di formazione di pattern sono fondamentali allo sviluppo ed alla sopravvivenza dell'organismo. Molti di questi meccanismi sono definiti dall'espressione spazio-temporale dei geni. Altri sono ritenuti essere influenzati da effetti epigenetici²² che accadono spontaneamente in presenza di tracce (che guideranno così il processo di *patterning*) ma che possono verificarsi pure in totale assenza.

Alan Turing per primo si interrogò sulle cause della generazione di pattern spaziali a partire da stati iniziali omogenei. Il suo metodo si fonda sull'interazione di due ipotetici agenti chimici o *morfogeni* (il primo, detto *attivatore*, autocatalitico, ed il secondo *inibitore* che contrasta l'autocatalisi del primo). L'effetto di inibizione si diffonde nel sistema più celermente rispetto quello di attivazione: se ne ottengono pattern di locale attivazione, o *reazione*, e di inibizione laterale, o *diffusione*.

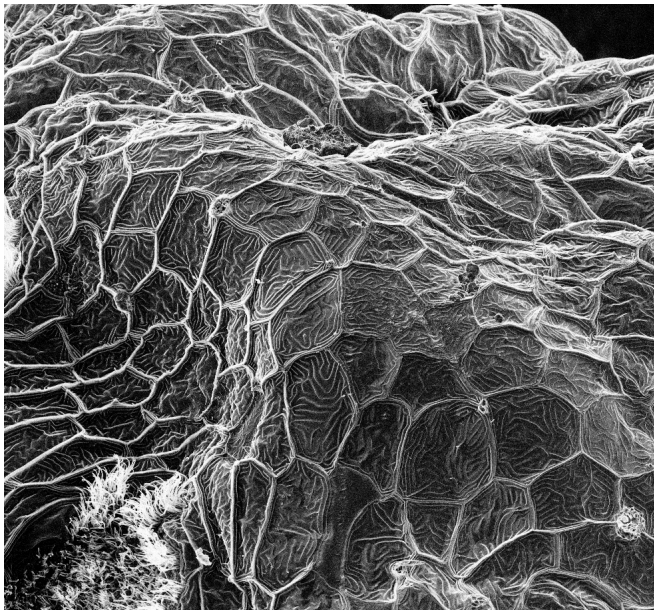
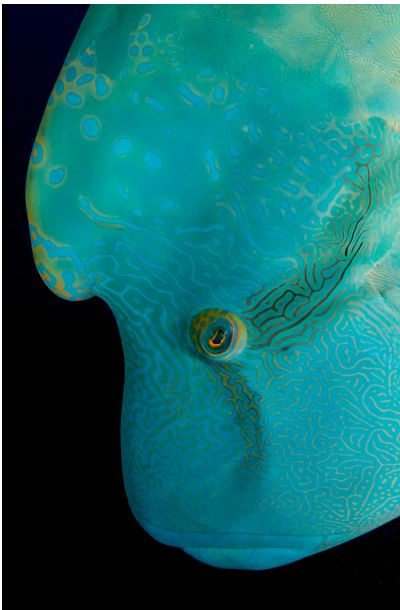
Se si associano distinti colori alle concentrazioni dei due morfogeni, se ne ricavano caratteristici pattern a macchie e strisce.

L'approccio *reaction-diffusion* è stato il modello teorico di pattern formation dominante, ed il meccanismo proposto ha permesso la comprensione di complessi body plan, dello sviluppo di organi specializzati, nonché dell'origine di pattern rintracciabili nelle livree di numerosi animali²³⁻²⁴.

Esistono poi modelli meccanici che portano alla formazione di pattern attraverso l'alterazione di un substrato che è stimolo autocatalitico capace di richiamare localmente le cellule.

Infine, i modelli cellulari di *pattern formation* ricorrono a stimoli chemiotattici²⁵: le cellule migrano attraverso i gradienti di concentrazione configurando così i pattern specifici.

- 22 / Cambiamenti che influenzano l'espressione fenotipica pur lasciando inalterato il genotipo.
- 23 / Il pesce napoleone (*Cheilinus undulatus*), dalla livrea dipinta con un motivo a vortici sempre più ridotti man mano che ci si allontana dagli occhi, è uno tra i numerosi organismi viventi che permettono di osservare i pattern di Turing. I motivi che si distribuiscono su tutta la pelle cambiano durante la crescita, mostrando la natura dinamica del meccanismo di reazione-diffusione.
- 24 / Una SEM mostra le micro-creste delle cellule epiteliali di un avannotto di pesce zebra (*Danio rerio*). Le creste delimitano i bordi di quelle che diventeranno squame durante la crescita.
- 25 / La chemiotassi, un tipo di tatticità, è il fenomeno con cui i corpi cellulari direzionano il proprio movimento a seconda della presenza di alcune sostanze chimiche nel loro ambiente.



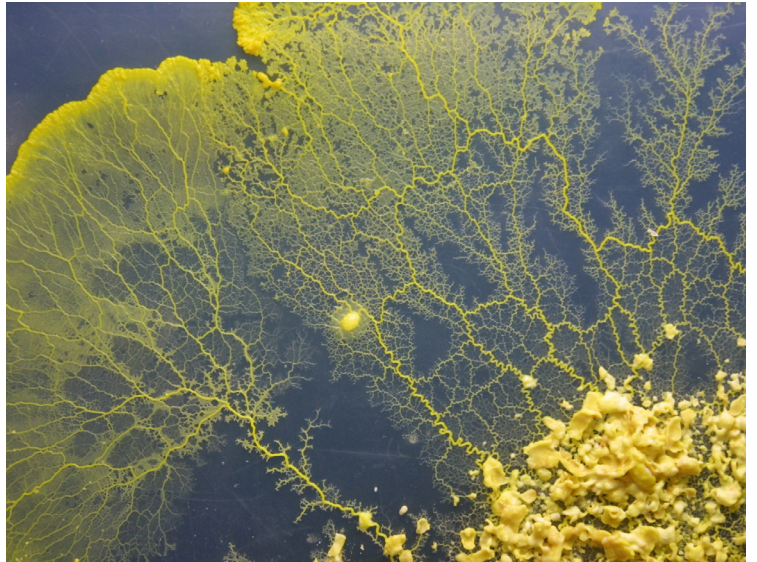
I meccanismi di *pattern formation* in natura sono solitamente fenomeni prodotti da popolazioni molto estese di entità discrete e relativamente autonome.

Sono rintracciabili sia nei sistemi viventi che in quelli non-viventi, ed emergono a scale spaziali e temporali completamente differenti.

Abbiamo già visto come pattern complessi tra sistemi viventi siano rintracciabili in presenza di colonie di animali, ma pure in aggregazioni ameboidi cellulari della specie *Dictyostelium discoideum* o in colonie batteriche.

E' poi utile notare la natura estremamente dinamica di questi pattern, in termini di *adattabilità* in risposta ai cambiamenti nelle condizioni ambientali (ad es. la disponibilità di nutriente), e di *resilienza* nei confronti di eventuale danneggiamento causato dall'esterno.

26 / Nonostante si tratti di un organismo unicellulare, il *Physarum polycephalum* rivela una forma piuttosto sofisticata di 'intelligenza'. Una tra le caratteristiche ad averla resa oggetto di recenti studi è la capacità di esplorare semplici labirinti evitando di ritornare su percorsi già esplorati utilizzando una propria secrezione come memoria esterna. Trattandosi di un organismo unicellulare, non possiede alcun sistema nervoso ed è pertanto oggetto di studio nel campo della robotica mobile autonoma.



Un organismo in particolare, la muffa cellulare *Physarum polycephalum*²⁶ esibisce un ampio repertorio di formazione pattern utilizzati per la crescita, il movimento, la ricerca di cibo e la distribuzione di nutriente, ma pure per evitare fonti di pericolo. La sua fase vegetativa (plasmodio) mostra comportamenti piuttosto complessi, da lungo studiati in dettaglio. Il plasmodio è in grado di percepire localmente gradienti di concentrazione: se si tratta di gradiente di nutriente si rilevano variazioni nella struttura degli strati costituenti la membrana esterna. La contrazione ed il rilassamento di uno strato membranoso genera un gradiente di pressione attraverso il quale il protoplasma fluisce. La forza del flusso di protoplasma è dunque causa della capacità motoria (flusso di spola) del *P. polycephalum*. Quando il plasmodio ha individuato fonti di cibo vicine, al suo interno compare un sistema di arterie che, connettendo le sorgenti di cibo, trasportano protoplasma da un estremo all'altro dell'organismo.

STUDI SUL MATERIALE



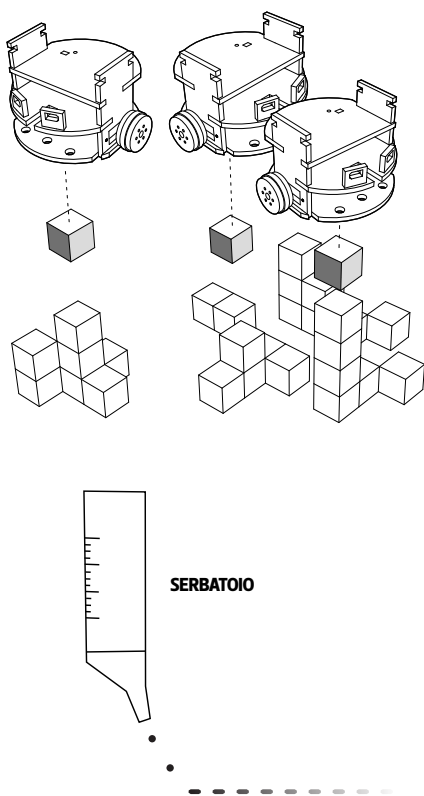
cristalli di Acetato di Sodio (SAT)

IPOTESI INIZIALI DI LAVORO

Lo sviluppo della costruzione creata dallo sciame di robot è stata pensata inizialmente secondo due possibili modalità: la prima ipotesi ¹ prevede un processo di crescita verticale dal basso verso l'alto conseguente a cicli di rilascio del materiale trasportato a bordo delle unità robot ed indurimento dello stesso sul piano di deposito.

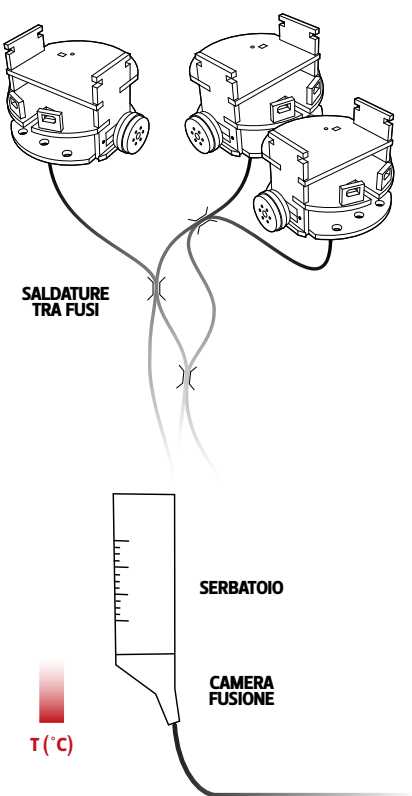
La seconda ipotesi ² concepisce la crescita non come risultato di una tecnica additiva in senso stretto, ma piuttosto utilizzando il fuso estruso come se fosse un filamento in sospensione, dunque in grado di intrecciarsi in strutture reticolari irregolari.

DROPPING



1 /
DROPPING
Ipotesi di crescita del sistema per accumulo di materiale,
rilasciato a intervalli regolari. Non si tratta dunque di tecnologia
estrusiva FDM: si opera con materiale a temperatura ambiente.

BUNDLING

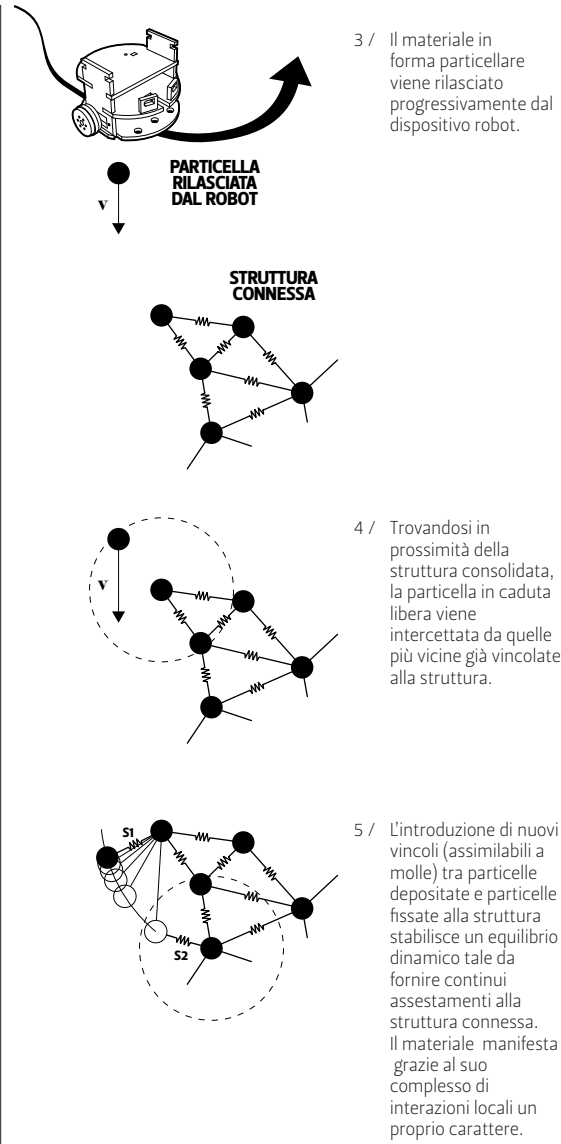


2 /
BUNDLING
Ipotesi di formatura di strutture fibrose costituite da intreccio di
fusi filamentosi estrusi con tecnoliga FDM. Un estrusore a bordo
del robot , dotato di camera di fusione per fondere il materiale
termoplastico, rilascia il filamento che perde capacità di saldarsi
con altri man mano che raffredda.

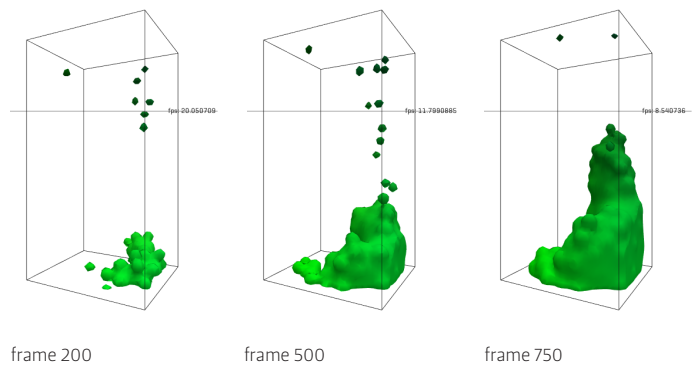
Entrambe le ipotesi rappresentano tecniche non dissimili dalle quelle più recenti che operano per deposizione di materiale allo stato fuso (FDM), pur con livelli inferiori di accuratezza e precisione. Va inoltre precisato che il materiale che di cui ci si è serviti in questa fase di prototipazione è funzionale all'obiettivo di prova di concetto; è per questo motivo che non ci si è riferiti a materiali convenzionalmente utilizzati nel settore edilizio/ architettonico.

SIMULAZIONE

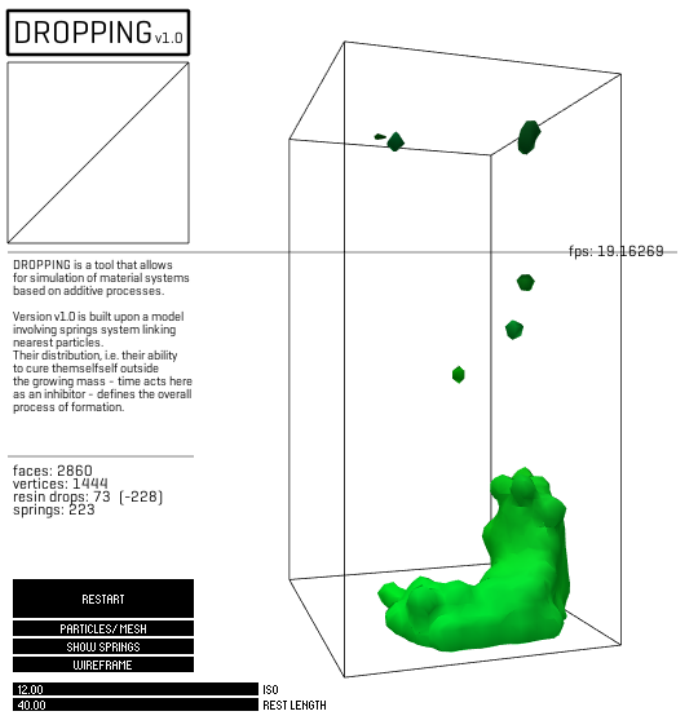
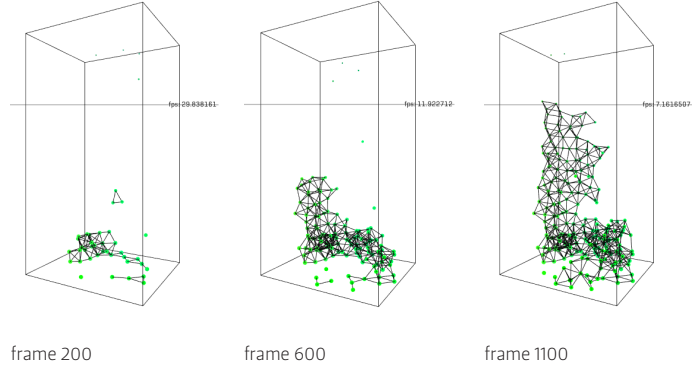
La simulazione di un materiale a viscosità progressivamente crescente è valutata, in questa prima ipotesi, predisponendo un sistema particellare connesso da molle (*springs*). Il modello prevede che le *particles*, in caduta libera e una volta superate le soglie di vicinanza predefinite, stabiliscano una connessione reciproca attraverso *springs*. Il processo di indurimento è interpretato come un fenomeno di irrigidimento delle molle connettenti le *particles* in funzione del tempo trascorso dal loro rilascio ^{3-5,6}. I valori di rigidità e di lunghezza 'a riposo' delle *springs* sono parametri che permettono l'esplorazione di comportamenti materiali da fluidi ed elastici, a quelli viscosi, fino ai rigidi e incompressibili.



DROPPING v1.0 / isoMesh



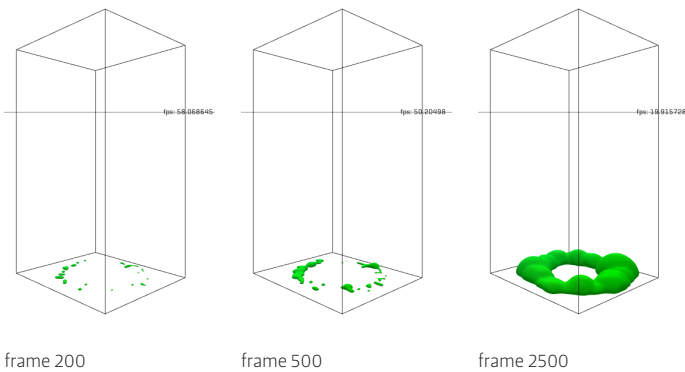
DROPPING v1.0 / particles e springs



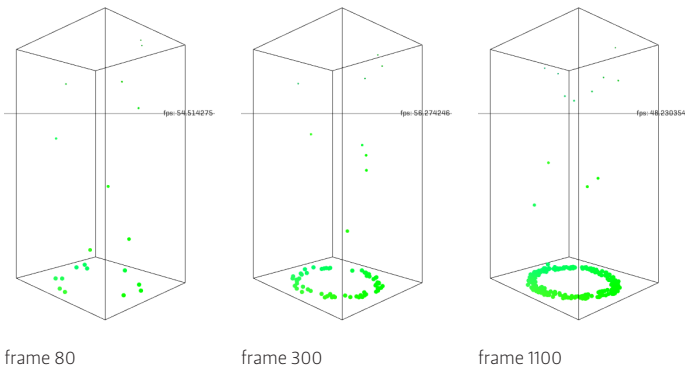
6 / Una schermata dell'applicazione DROPPING che si è sviluppata per simulare sistemi materiali ispirati a processi additivi. Le *springs* connettenti le particelle sono dotate di un contatore interno che consente un progressivo irrigidimento delle connessioni più vecchie: emerge così un comportamento simulato che rimanda a materiali capaci di crescere per indurimento o asciugatura a partire da uno stato liquido.

Una seconda modalità di simulazione di materiale fluido-viscoso si è proposta ricorrendo alla classe *VolumetricBrush* delle librerie sviluppate da Karsten “toxi” Schmidt per Processing. In questo caso il modello prevede la discretizzazione del piano di deposito in una matrice bidimensionale che raccoglie le deposizioni rilasciate dall’alto. Per ogni cella della matrice si stabilisce una corrispondenza tra numero di deposizioni cadute in corrispondenza di quella e il valore di dimensione con cui il *VolumetricBrush* interverrà localmente nello spazio voxel.

DROPPING v2.0 / isoMesh



DROPPING v2.0 / posizioni dei brushStrokes



Si rilevano tuttavia dei limiti nella capacità di elevazione della mesh che va a definirsi, oltre ad una scarsa capacità di definire continuità e connessione tra il materiale depositato, effetto che si percepisce come una successione di blob (alta densità di deposito) e sottili filamenti (bassa densità di deposito).

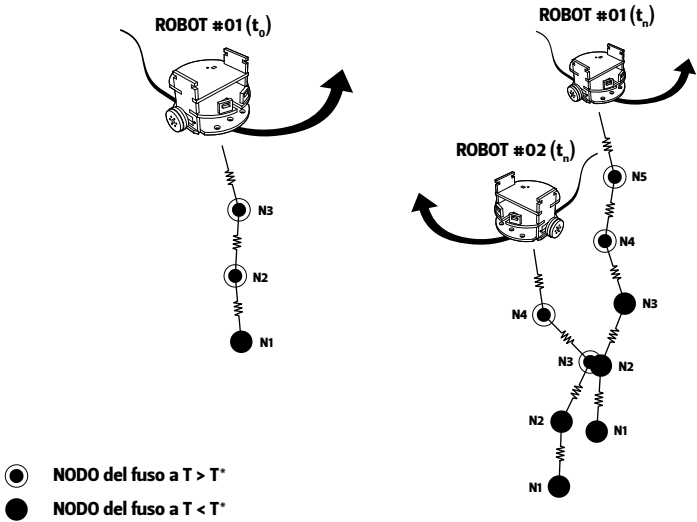


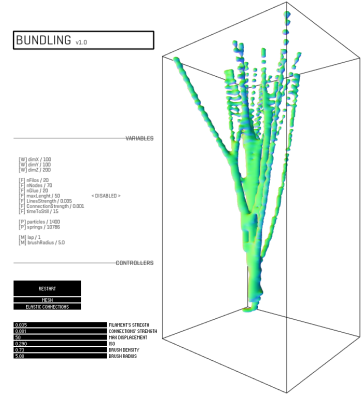
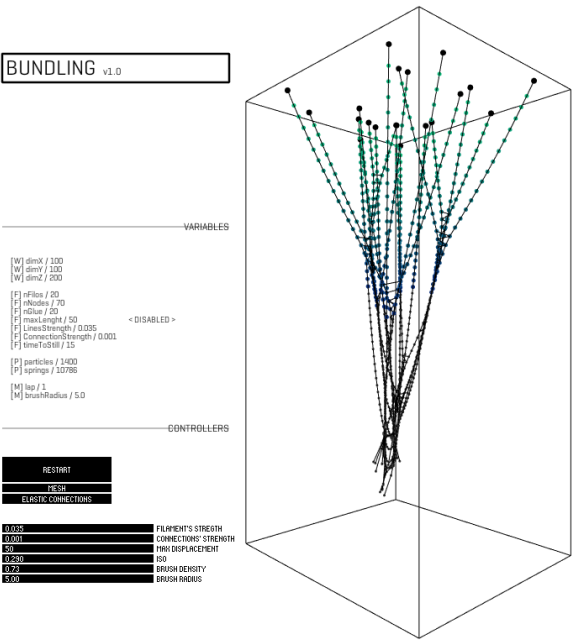
- 7 / FDM (fused deposition manufacturing) è una tecnologia di fabbricazione che prevede la fusione e l'estrusione in filamento di un materiale termoplastico.
- 8 / L'introduzione di vincoli (assimilabili a molle) tra particelle depositate e particelle fissate alla struttura stabilisce un equilibrio dinamico tale da fornire continui assestamenti alla struttura connessa. Il materiale manifesta grazie al suo complesso di interazioni locali un proprio carattere.

Alle strategie di deposizione per *dropping* viste in precedenza, si è valutata parallelamente la possibilità di una modalità costruttiva basata su rilascio di materiale fibroso.

Prendendo in prestito alcune modalità operative proprie delle tecnologie FDM ⁷ ne è emerso un modello per alcuni aspetti differente ⁸. Il primo fondamento a saltare è stato quello che impone per queste tecnologie una crescita per layering della forma di riferimento che si vuole convenzionalmente replicare (un modello digitale).

Ho ipotizzato in tal senso di lasciare lavorare in modo non predeterminato gli individui di una popolazione di robot (punti neri in movimento), vincolati a muoversi su di un piano (il piano orizzontale superiore del parallelepipedo) senza un percorso stabilito a priori.



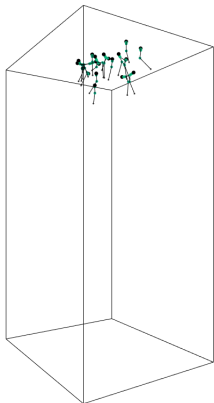


9 / Si è sviluppata un'applicazione che simula il comportamento di bundling descritto. L'interazione tra i sistemi particellari che schematizzano il materiale termoplastico fuso vengono visualizzati anche tramite mesh. Nella pagina accanto sono riportate alcune sequenze estratte da un'animazione.

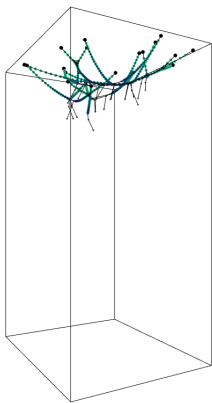
La squadra di robot-costruttori è pensata in grado di rilasciare un materiale filamentoso che ha consistenza plastica. Riprendendo l'analogia con le tecniche FDM, possiamo pensare queste unità robot come numerosi terminali estrusori in movimento. Man mano che il singolo filamento estruso si raffredda perde la sua capacità di saldarsi con altri filamenti, creando connessioni non prevedibili che realizzano strutture spaziali fibrose e complesse.

Non vi è in questa prima esplorazione una precisa ricerca di soluzioni ottimali, dal momento che non è formulato un obiettivo che stabilisca il criterio rispetto il quale valutare il beneficio generato dalla specifica soluzione adottata dal robot. Lavorando già dalle prime fasi con questa libertà è possibile cogliere le potenzialità in termini morfogenetiche conseguenti ai distinti approcci materiali: la strategia qui proposta rimanda ai ben noti esperimenti di *bundling* condotti da Frei Otto. Si tratta di un sistema auto-organizzante in cui è il materiale a negoziare le diverse forze in gioco (gravità, tensioni interne al materiale) senza che venga imposta su di questo alcuna forma a priori. Il sistema proposto, realizzando strutture di agglomerati fibrosi, mostra il suo punto di forza –specialmente se confrontato con altre soluzioni di crescita additiva– nel ridurre il rapporto tra materiale impiegato e volume occupato dalla costruzione ⁹.

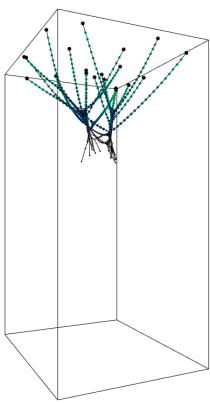
BUNDLING v1.0 / particles e springs



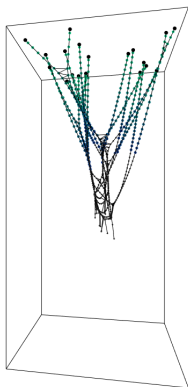
frame 100



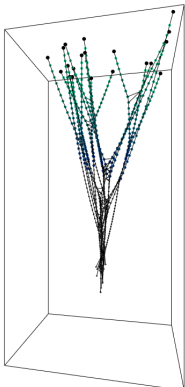
frame 400



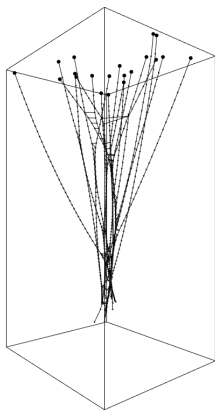
frame 700



frame 900



frame 1200



frame 1400

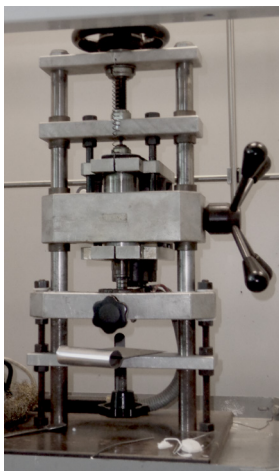
POLYCAPROLACTONE

La ricerca di un possibile candidato tra i materiali da adottare nella fabbricazione robotica si è inizialmente orientata verso i materiali termoplastici. Se da un lato è consolidato l'utilizzo di polimeri termoplastici nell'ambito delle tecniche di modellazione a deposizione fusa, è fatto ancor più noto che gli stessi materiali richiedano temperature piuttosto elevate per poter essere plasticizzati ed estrusi. Alcuni esempi tra i più noti ed utilizzati: l'*Acrilnitrile Butadiene Stirene* (ABS) comincia a rammollire a partire dai 105 °C, l'*Acido Polilattico* (PLA) fonde invece in un intervallo di temperature più elevato, tra i 150-160 °C. Il raggiungimento di temperature simili è normalmente consentito disponendo di importanti carichi di tensione e voltaggi. Perseguendo l'obiettivo di azionare le unità robot in simultanea, si è evitato l'utilizzo di connessioni o cavi che potessero rivelarsi di intralcio alle operazioni di costruzione e agli stessi spostamenti: l'elettronica è stata dunque alimentata installando a bordo di ciascuna unità batterie dimensionate secondo i carichi energetici previsti. Questa scelta, tuttavia, ha reso chiaro fin da subito l'impossibilità di raggiungere le temperature utili alla fusione di polimeri come il PLA o l'ABS. Discutendo di questo vincolo con l'Ing. Martino Colonna (Ricercatore presso il DICASM, Facoltà di Ingegneria di Bologna), è stato così suggerito di testare il polimero *Polycaprolactone* ^{10,11} che si caratterizza per una temperatura di fusione di 60 °C, di gran lunga inferiore a quella degli altri polimeri.

Il Polycaprolactone (PCL) è un polimero semicristallino sintetico e biodegradabile. Essendo dotato di buone caratteristiche di biocompatibilità e di un'elevata stabilità termica, è molto utilizzato nel campo delle applicazioni biomedicali; ha inoltre una buona resistenza nei confronti del cloro, dell'olio, dell'acqua e dei solventi in genere.
fonte: Wikipedia



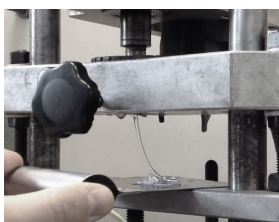
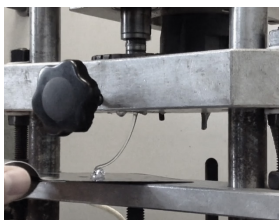
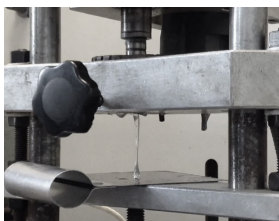
- 10 / Scarti da estrusione di PCL
- 11 / Il materiale grezzo si presenta allo stato granulare: il raggiungimento della temperatura di rammollimento permette l'estrusione in filamento. Maggiori sono le temperature, minori sono le resistenze viscose che la massa fusa oppone al processo di estrusione.



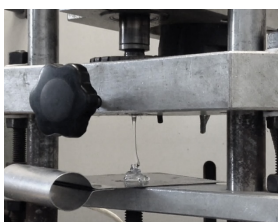
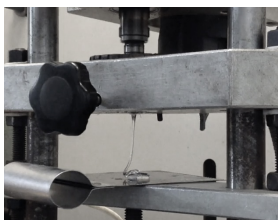
12 / Estrusore a vite messo a disposizione dal DICASM per la fusione di materiali termoplastici granulari.

E' stato così possibile valutare presso i laboratori del DICASM la viscosità dei fusi di *PCL* per temperature crescenti della camera di estrusione di un estrusore a vite azionato manualmente ¹². Si è potuto consatatare che:

1. una maggiore temperatura della camera di estrusione determina una minore viscosità del fuso, e dunque minori resistenze all'estrusione;
2. già a 80 °C il fuso diventa facilmente estrudibile, confermando un importante risparmio energetico necessario per una alimentazione di tipo wireless;
3. il materiale, raffreddando al di sotto dei 60 °C nella caduta verso il piano di deposizione, è in grado di unirsi saldandosi con altri eventuali fusi, mantenendo tuttavia integro l'aspetto filamentoso. Questa sua performance – ovvero un ristretto intervallo di temperatura che separa lo stato fluido-viscoso e quello solido del materiale – fa supporre che il *PCL* sia idoneo rispetto lo specifico obiettivo di costruzione di network fibrosi tridimensionali.



T = 80 °C



T = 140 °C

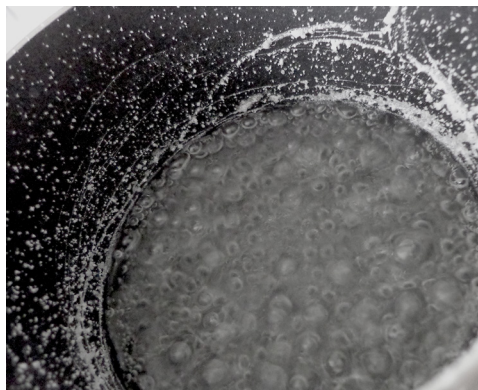
COMPOSTI IONICI / SOLUZIONI SUPERSATURE / ACETATO DI SODIO

Composto è il termine con cui in Chimica si intende un insieme di più elementi. Il sale da cucina, o *cloruro di sodio*, ad esempio, è costituito da atomi di sodio e di cloro. Quando il composto contiene sia un metallo che un non metallo –secondo la classificazione della tavola periodica degli elementi– si ha a che fare con un composto ‘ionico’. Alcuni composti ionici si dissolvono in acqua e durante tale processo il metallo caricato positivamente – catione – si separa dal non metallo di carica negativa – anione. Il fenomeno detto *precipitazione* è dunque il processo inverso: catione ed anione si combinano reciprocamente a formare cristalli solidi nella soluzione.

L’abilità di un composto nel dissolversi in acqua è definita *solubilità*. Convenzionalmente, il composto presente in minor quantità è detto *soluto*, quello presente in maggiore quantità *solvente*. Nel caso di un solido disciolto in un liquido, quest’ultimo si dice *solvente*. La *saturatione* avviene quando la massima quantità di soluto è stata disciolta in una data quantità di solvente. Alcuni composti mostrano una tendenza alla solubilità più spiccata di altre, ma per tutti la solubilità varia con la temperatura. Temperature elevate permettono di disciogliere maggiori quantità di soluto in una certa quantità di solvente. Il processo della sovrasaturazione, o *supersaturazione di soluzioni* è dunque legata a processi di trasformazione di temperatura.

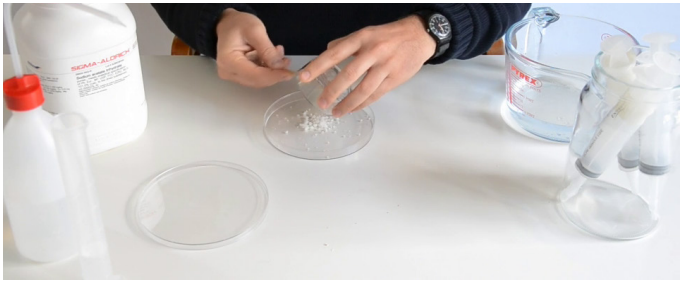
Si ha fenomeno della *supersaturazione* quando la quantità del soluto disciolto in una data quantità di solvente eccede il punto di saturazione¹³.

Perché si abbia precipitazione deve formarsi nella soluzione un cristallo solido (*nucleazione*). Una volta formato il cristallo, il processo della *crescita* aumenta la formazione dei cristalli alla scala macroscopica dunque il fenomeno sarà visibile¹⁴. Non può esserci crescita senza *nucleazione* sebbene in alcune condizioni parte del soluto possa opporsi a tale



- 13 / Per ottenere la soluzione supersatura di acetato occorre scindere i legami che permettono la formazione di cristalli, quindi portando a completa fusione il materiale grezzo.
- 14 / Particolare dei cristalli formati a partire dalla soluzione sovrasatura. Tanto più elevata è la concentrazione della soluzione di acetato, tanto maggiore sarà la solidità dei cristalli che si formeranno.

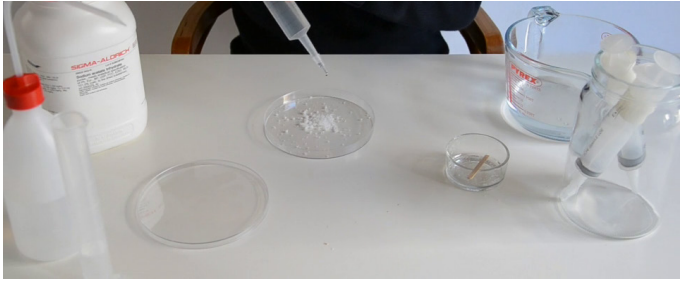
processo. Perché tale processo abbia inizio occorre solitamente una superficie con qualche irregolarità: può trattarsi di un’impurità come ad esempio pulviscolo o polvere o una micro-fessura del contenitore di vetro in cui si trova la soluzione. Allo stesso modo, è possibile avviare intenzionalmente la *nucleazione* aggiungendo una piccola quantità di cristalli già precipitati della medesima sostanza. L’acetato di sodio (CH_3COONa) è un composto ionico costituito da cationi di Sodio (Na^+) e ioni acetato ($\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2(-)$). Come molti acetati, è facilmente solubile in acqua: 76 g si dissolvono in 100 ml di acqua a 0°C. La solubilità aumenta notevolmente a temperature elevate. Nel realizzare il ghiaccio caldo, si satura una soluzione di acetato di sodio con acqua calda e successivamente la si raffredda. In questo modo la concentrazione di acetato di sodio rimane superiore a 76 g per 100 ml, dunque la soluzione si supersatura.



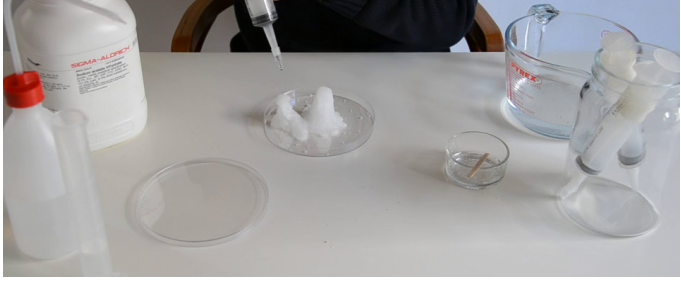
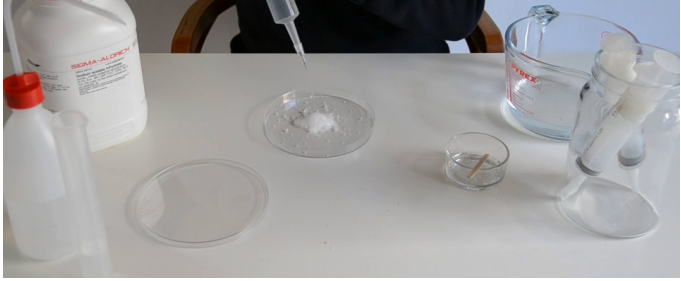
15 / Perché la reazione di cristallizzazione sia avviata è utile predisporre sulla superficie di deposizione uno strato di cristalli di acetato.



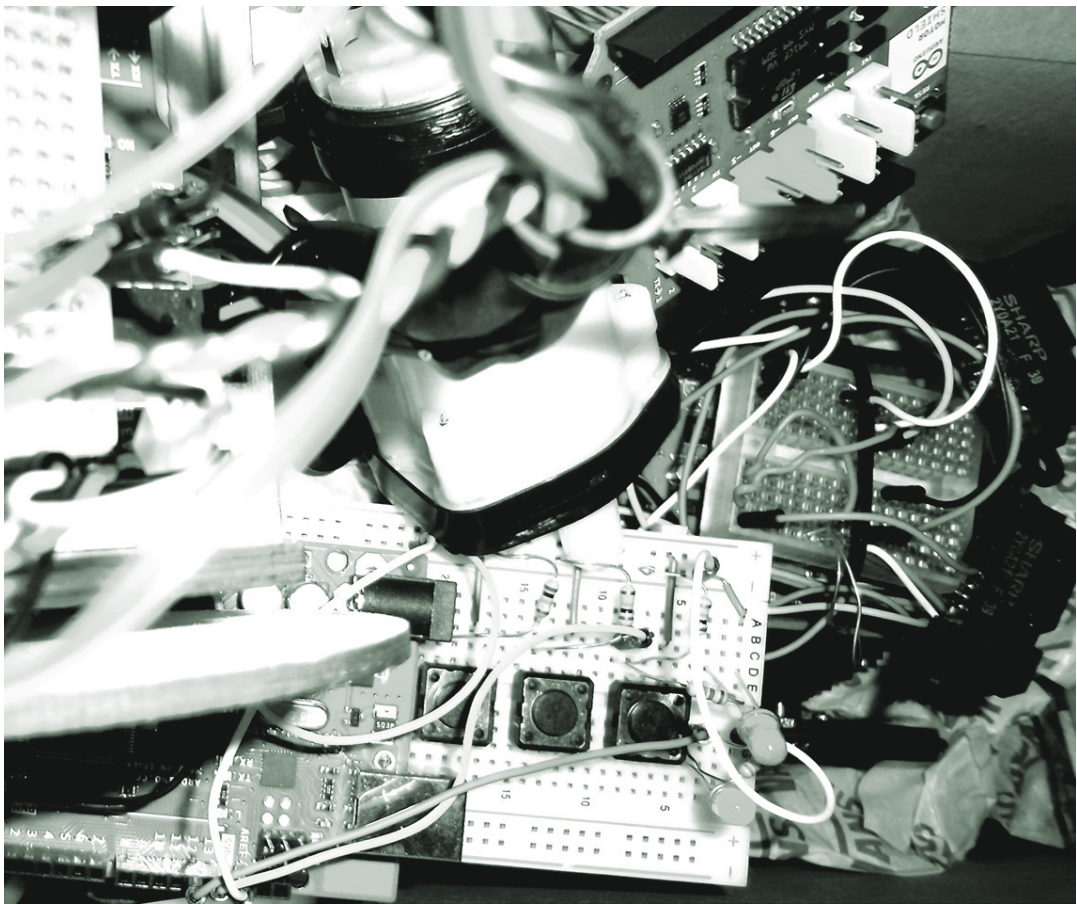
16 / Nel prelevare un quantitativo di soluzione sovrasatura occorre prestare particolare attenzione: tanto uno shock meccanico quanto una impurità presente all'interno della siringa può innescare precocemente la cristallizzazione.



17 / Il materiale grezzo si presenta allo stato granulare: il raggiungimento della temperatura di rammollimento permette l'estrusione in filamento.



STUDI TECNICI



1 / “Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks”, J.Jones, in *Artificial Life* vol.16 (2), 2010

IPOTESI INIZIALI DI LAVORO

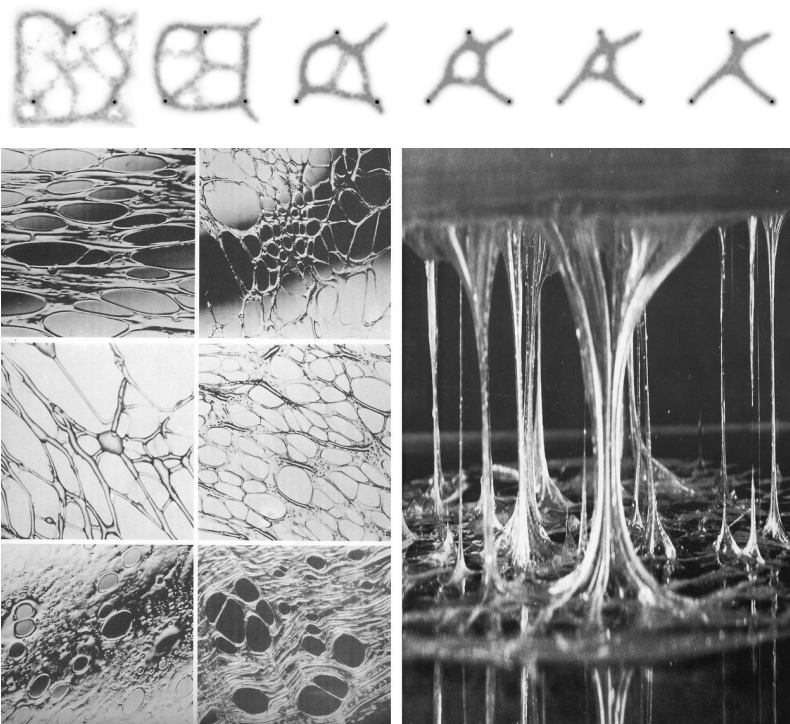
Lo sviluppo tecnico del progetto è stato in diverse fasi influenzato dal modello multi-agente sviluppato da Jeff Jones, ricercatore in Unconventional Computing presso l'Università del West England, Bristol. Nel Marzo 2010, Jones pubblica un paper intitolato “Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks”¹: viene proposto un modello che utilizza un approccio multi-agente come mezzo per la costruzione di reti dinamiche sintetiche e bottom-up di trasporto. Ritengo a questo punto indispensabile introdurre alcuni aspetti fondanti lo sviluppo del presente lavoro che fanno riferimento allo studio citato.

Lo studio si ispira ad un organismo semplice che abbiamo già incontrato, la muffa cellulare *Physarum Polycephalum*. Per questo organismo, la formazione di pattern è intrinsecamente legata ad aspetti di crescita e comportamento: lo studio mostra l'emergenza di pattern complessi e della loro evoluzione ad opera di una popolazione (simulata) di agenti allo stato particellare. Utilizzando semplici comportamenti locali basati su *chemiotassi*, la popolazione in movimento degli agenti forma spontaneamente complesse strutture reticolari di trasporto.

L'interesse rivolto all'approccio di Jones nel contesto del presente lavoro è duplice. Da un lato, i pattern e la loro evoluzione nello spazio-tempo mostrano esplicitamente un'intrinseca natura tettonica. Jones dimostra come l'utilizzo di pre-pattern delle tracce di sostanza chemioattraente sia capace di condizionare l'evoluzione dei pattern verso configurazioni a rete che manifestano proprietà funzionali o quasi-fisiche ²: se ne ricavano impressioni di fenomeni di tensione superficiale, o comportamenti di minimizzazione delle superfici senza alcun esplicito controllo sul comportamento individuale degli agenti ³. Dall'altro, l'organismo *Physarum* è un organismo candidato ideale per una robotica di piccole dimensioni in quanto genera spontaneamente movimento ed esibisce comportamento complesso a partire da semplici regole di interazione.

2 / Effetto di minimizzazione per contrazione filamentosa di una rete connettente le tre fonti (in nero) di chemioattrattore. Fonte: J.Jones

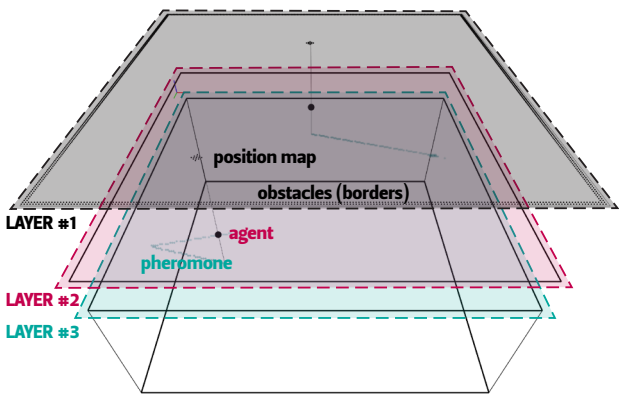
3 / Strutture filamentose si formano spontaneamente negli stati liquidi.



E' stato così realizzato un veicolo di Braitenberg⁴ che si serve di uno stimolo luminoso per influenzare il proprio meccanismo di guida. Oltre alle specifiche abilità percettive-motorie e coerentemente al modello proposto da Jones, l'agente robot è stato dotato di un sistema di attuazione grazie al quale modificare lo spazio in cui si sarebbe trovato ad operare.

Si descrivono anzitutto gli elementi costitutivi del sistema basato sul modello di stigmergia chemiotattica di Jones.

L'ambiente abitato dagli agenti è definito in termini di immagine bidimensionale digitalizzata su scala di colore, ed i suoi confini sono costituiti dalla larghezza e altezza dell'immagine. Ai livelli di un determinato colore sono associabili valori esprimenti caratteristiche come porzioni abitabili dell'ambiente, ostacoli limite, fonti di stimolo come cibo, ecc.



Si è adottato un approccio 'a layer': analogamente al livello che mostra i dati ambientali (livello che individua la configurazione dell'ambiente e che accoglie la popolazione di agenti), è possibile utilizzare altre strutture dati, identiche in dimensione e riferite al sistema di coordinate globale⁵. Il *livello della traccia* ad esempio immagazzina lo stimolo chemiotattico che l'agente rilascia e ricerca al contempo. La struttura è del tipo semi-continuo: ciascuna cella della griglia può contenere un solo agente ed è individuata da coordinate discrete. Nonostante questa impostazione, gli agenti conservano una definizione della propria posizione e direzione a virgola mobile: con arrotondamento è poi possibile individuare la posizione discreta della cella più vicina. L'approccio semi-continuo permette di superare le limitazioni in termini di connettività e movimento che sarebbero imposte da un'architettura interamente discreta.

Il contenuto di un livello -è il caso del *livello traccia*- è poi soggetto a fenomeni ambientali globali come evaporazione o diffusione.

Si definisce *iterazione di sistema* ciascun campionamento sensoriale operato sull'ambiente da parte di ogni membro della popolazione, nonché della conseguente movimentazione.

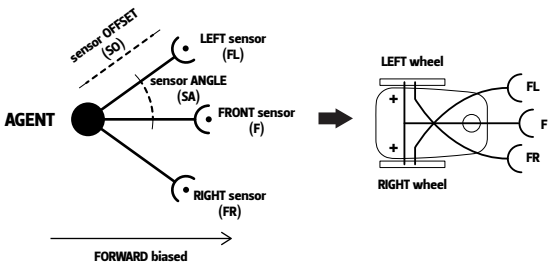
4 / Il veicolo di Braitenberg viene teorizzato in un esperimento mentale dallo studioso di cibernetica Italo-Austriaco Valentino Braitenberg con lo scopo di mostrare secondo una modalità evolutiva le capacità di semplici agenti intelligenti. Il veicolo rappresenta la più semplice forma di intelligenza artificiale basata sul comportamento ed il concetto di *embodied cognition*, ovvero di comportamento intelligente che emerge dall'interazione senso-motoria tra agente e ambiente, nel caso di semplici veicoli senza ricorrere ad una memoria interna o ad una rappresentazione dell'ambiente (inferenza).

Un veicolo di Braitenberg è un'agente in grado di muoversi autonomamente in base ai suoi input sensoriali. È dotato di sensori primitivi (che rilevano un certo stimolo ad un dato istante) e di ruote (ciascuna azionata da un proprio motore) che hanno il ruolo di attuatori o effettori. Un sensore, nella più semplice delle configurazioni, è direttamente connesso ad un'effettore, cosicché un segnale percepito viene istantaneamente tradotto in un movimento della ruota. In base alle modalità con cui i sensori e le ruote sono connesse, il veicolo esibisce una varietà di comportamenti (che possono essere di tipo goal-oriented).

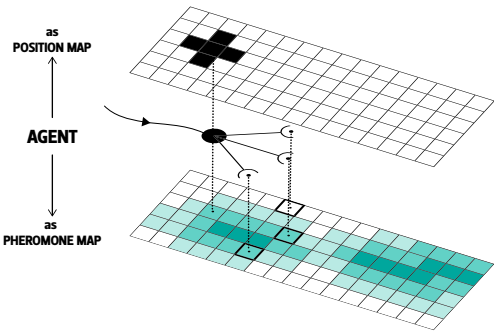
5 / Schematizzato in alto a sinistra, il modello 'a layer' o mappe. Per ciascuna mappa, sono disponibili informazioni in forma di immagine discretizzata. E' possibile visualizzare più livelli informativi sovrapponendo le mappe come nell'immagine in alto a destra: la mappa che riporta i livelli traccia (chemioattrattore) è visibile in gradienti di verde, mentre in nero sono individuabili le posizioni degli agenti (o gli agenti stessi).

Gli agenti seguono semplici comportamenti del tipo stimolo-risposta: ogni singolo agente è assimilabile ad una particella della struttura sol-gel del plasmodio di *Physarum*. La particella in movimento è assimilabile al flusso di sol nel protoplasma. Viceversa, l'impossibilità della particella di muoversi identifica la matrice immobile di gel.

Ogni agente viene inizializzato in una posizione casuale tra quelle libere dell'ambiente discretizzato, e con un'orientamento casuale. Sono stati valutate anche distribuzioni ordinate delle posizioni di partenza (si vedano più avanti i fermo-immagine delle simulazioni).



- 6 / La morfologia dell'agente simulato e la corrispondente interpretazione del veicolo di Braitenberg. L'agente si orienta nell'ambiente informato dai diversi livelli-mappe.
- 7 / Si definisce *autocrino* il sistema di segnalazione cellulare in cui una sostanza prodotta da una cellula va a modificare il comportamento della cellula stessa.



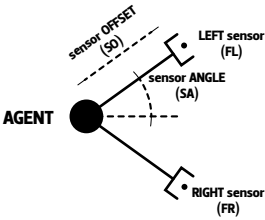
La morfologia generale dell'agente è tale per cui gli stimoli chemiotattici vengono rilevati dall'ambiente (la mappa dell'intensità chemioattrattiva è immagazzinata nel livello traccia) tramite tre sensori frontali: l'agente risponde alle differenze di concentrazione del chemioattrattore variando la propria futura posizione orientandosi a destra o sinistra rispetto l'attuale direzione assunta ⁶. Va fatto notare che, rispetto ai tipici modelli agent-based, la distanza di posizionamento dei sensori è grande (soprattutto in relazione alla dimensione dell'agente), aspetto che farebbe pensare ad una modalità di lettura da remoto. Tale scelta rimane coerente con la scelta del modello del *Physarum*, per cui la struttura a rete actina-miosina va a sovrapporsi al sistema gel del plasmodio. Il forte accoppiamento, che si genera tra le fasi sensoriali degli agenti della popolazione per la distanza a cui sono posizionati i sensori, è necessario all'emersione di comportamento globale complesso. La coesione di questa moltitudine aggregata è garantita dalla mutua attrazione verso lo stimolo che è accresciuto da ciascun agente. La popolazione adotta comportamento chemiotattico *autocrino* ⁷ (gli agenti rilasciano e percepiscono l'approssimarsi del medesimo chemioattrattore, cosicché le azioni dei singoli influenzano i comportamenti).

Ad ogni iterazione, ciascun agente tenta di muovere nella direzione stabilita. Si procede così con il comportamento percettivo: se per l'agente il movimento è possibile (cioè se non vi è impedimento dovuto alla presenza, nella cella destinazione, di un altro agente), questo si trasferisce nella nuova posizione e lì rilascia un valore costante di chemioattrattore. In caso contrario, non avviene spostamento per l'agente che neppure rilascia chemioattrattore: si procede infine ad alterare la futura direzione di movimento scegliendo tra due rotazioni possibili in modo casuale.

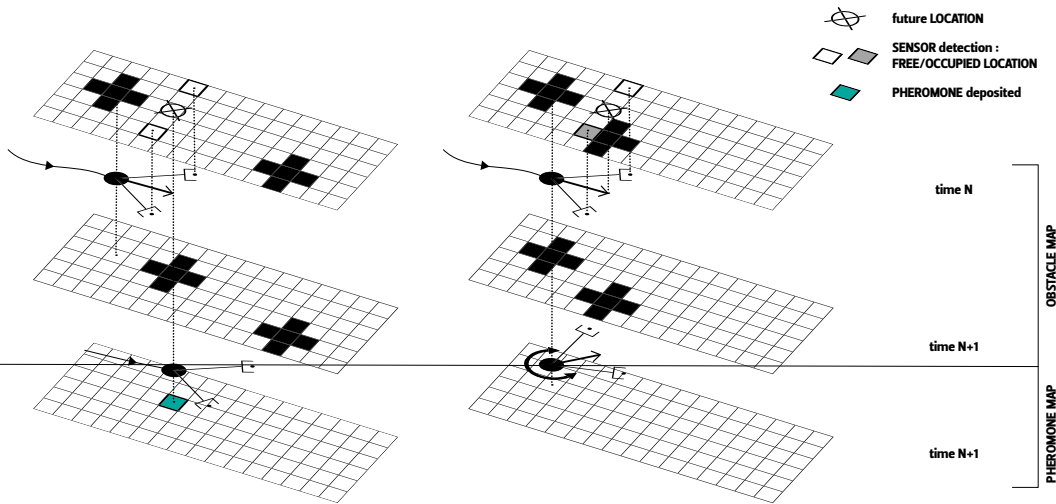
E' necessaria una precisazione riguardante la corrispondenza tra morfologia simulata e l'hardware che darà corpo all'agente. Il tentativo di movimento nel modello di Jones viene effettuato sulla base di un controllo che 'interroga' direttamente la mappa a partire dall'informazione (vettoriale) del movimento atteso. Se ad ogni iterazione è consentito un movimento unitario (la cella adiacente a quella occupata attualmente) ed è nota la direzione associata allo stesso movimento, si ottengono le coordinate di destinazione. La lettura della mappa degli ostacoli (immagine che riporta le posizioni di tutti gli agenti all'opera e di eventuali ostacoli, barriere, confini...), interrogata in corrispondenza di quelle coordinate, ci fornirà l'informazione necessaria a decidere se operare o meno il movimento calcolato. Questa rappresentazione dell'informazione in un

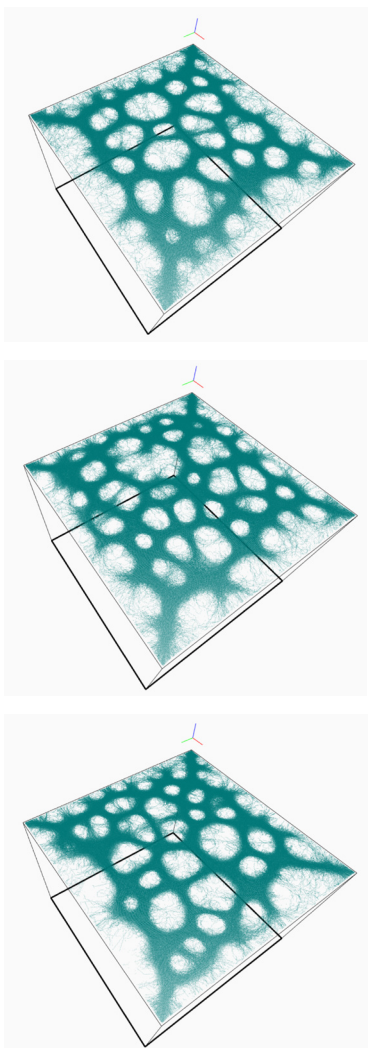
ambiente simulato presuppone, nell'equivalente fisico, l'utilizzo di apparati di senso, come del resto già proposto da Jones per la lettura dell'informazione chemiotattica.

L'introduzione di due sensori frontali⁸ è nata dunque da una esigenza di rilevare la 'presenza' fisica di ostacoli all'agente robotizzato. In termini di simulazione, questa novità implica un livello aggiuntivo di variabilità del sistema: la stessa tipologia di parametri che definivano prima la capacità sensoriale nei confronti della traccia di chemio attrattore, servono ora a specificare la capacità di rilevare ostacoli.



- 8 / La morfologia dell'agente simulato nei confronti della tattica di *obstacle avoidance*: due parametri servono a definire l'apparato sensoriale frontale che specifica una pseudo-visione binoculare.
- 9 / A sinistra, l'agente non rileva ostacoli sul suo percorso, dunque può effettuare lo spostamento desiderato e rilascia una quantità di chemioattrattore nell'ambiente. A destra, l'ostacolo (un altro agente) rilevato da uno dei due sensori, impone un cambio di rotta: si procede così ad una rotazione del vettore spostamento, a cui seguirà di nuovo il controllo di presenza/assenza ostacoli. Nel caso di movimento impedito non si ha rilascio di chemioattrattore.





10 / La natura dinamica della rete esibisce proprietà emergenti e complesse: le aree circolari più piccole della rete si riducono gradualmente fino a scomparire. Ne risulta una predominanza ed espansione di aree vuote che fanno restringere quelle più piccole. Talvolta, una biforcazione appare in una zona di confine della rete ed un nuovo ramo di chemioattrattore si fa strada attraverso un'area vuota: si tratta di agenti che stanno procedendo in rettilineo.

Definiremo d'ora in poi *line following* la tattica che porta l'agente a muoversi in direzione della più elevata concentrazione di chemioattrattore rilevato. La definizione di *obstacle avoidance* starà invece ad indicare la tattica che il robot adotterà al fine di evitare collisioni con ostacoli fissi o in movimento (come ad esempio altre unità robot). Il modello è definito da un numero di parametri che governano la struttura multi-agente come un tutto, ed il comportamento degli agenti nello specifico. Nonostante siano numerosi, i parametri che influenzano i pattern emergenti sono tre per quanto concerne gli agenti (*SA*, *RA* ed *SO*), e due per la struttura (*%p* e il fattore di evaporazione).

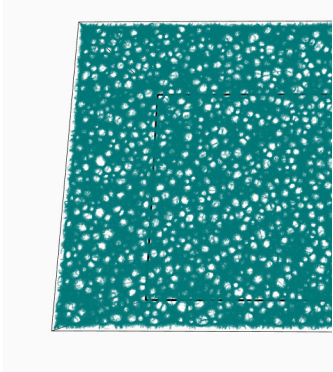
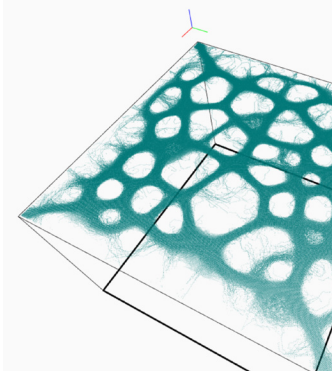
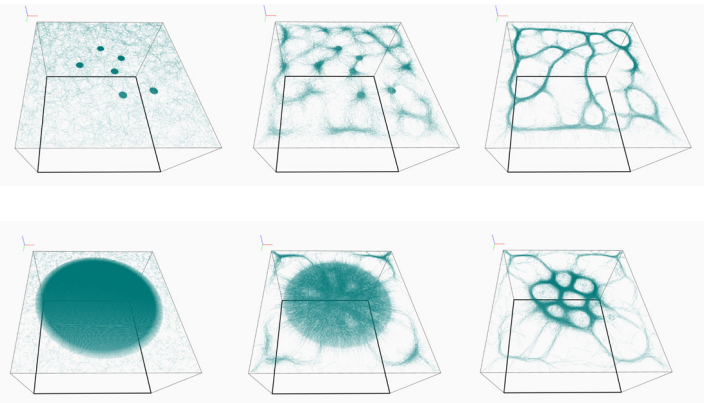
I singoli agenti rilasciano chemioattrattore quando il loro tentativo di movimento ha successo ⁹. Questo comportamento garantisce che gli agenti più vicini vengano attratti dalla sorgente di chemioattrattore più intensa attivando così un ciclo di azione-reazione positivo. In questo modo si formano le reti caratterizzanti i pattern generati ¹⁰. Si osserva un'evoluzione dinamica della rete il cui aspetto è in continua mutamento ma costante nel numero delle parti costitutive. Per valori default dei parametri (*RA* 45°, *SA* 22.5°) la rete non si stabilizza mai (si osservano invece regimi temporanei di stabilità). Se ne deduce questa relazione: un qualunque cambiamento nella struttura della rete (ad esempio una ramificazione) influenza il flusso locale degli agenti, che a sua volta influenza la struttura della rete e così via.

La ragione dell'evoluzione dinamica della rete a cui si assiste per valori standard dei parametri risiede nella differenza tra gli angoli associati alla rotazione e quelli associati alla posizione del sensore (*RA*>>*SA*): la grande rotazione subita dall'agente porta i sensori al di fuori del flusso gradiente principale. In aggiunta, la rotazione casuale imposta alla direzione di spostamento di ciascun agente (che permette di evitare collisioni) provoca la stabilizzazione ed il rafforzamento di una nuova biforcazione. Per valori di *RA* ed *SA* identici (45°) si assiste alla medesima evoluzione della rete, ma la biforcazione e la ramificazione di nuove scie non persiste. In questo caso, le grandi aree vuote tendono ad ingrandirsi man mano che quelle piccole si contraggono.

L'aspetto del pattern assunto dalla rete è ulteriormente influenzato dalla distribuzione iniziale (casuale) degli agenti nonché dal loro orientamento (casuale anch'esso). Il parametro *SO* (distanza tra la posizione dell'agente e quella dei sensori) opera come un fattore di scala: valori piccoli di *SO* esibiscono una risoluzione della struttura più fine, mentre valori più grandi producono pattern ampi e pattern a rete più grossolani ¹¹.

Sono poi stati testati gli effetti sulla simulazione a partire da semplici tracce di chemioattrattore fornite all'avvio della simulazione così da valutare condizioni di iniziale eterogeneità del *layer traccia*. Con la terminologia *pre-patterning* ci si riferirà a questa specifica modalità di intervento: si tratta di un'operazione preliminare che stabilisce una forma 'morbida' di controllo *top-down* sull'evoluzione del sistema. I *pre-patterns* sono immagini in scala di grigio che vengono lette da codice interprete in grado di discretizzare l'immagine e campionarne l'intensità. Per ogni punto di campionamento si attribuisce un incremento di intensità del chemioattrattore da associare alla corrispondente cella costitutiva la matrice 2D del *layer traccia* ¹².

L'interesse di questo approccio risiede nella capacità emergente – non specificata esplicitamente nell'algoritmo dell'agente-particella – che la rete, costituita dagli agenti, esibisce nel condensare nelle zone di forte stimolo chemiotattico. L'evoluzione delle reti sotto l'influenza di stimoli *pre-patterning* sembra esibire effetti quasi-fisici di tensione superficiale, "...comportamenti di minimizzazione tipici della formazione dell'albero di Steiner ¹³ ¹⁴. Gli effetti di tensione superficiale – che ricordano le superfici delle bolle di sapone – tendono dopo numerose interazioni di sistema a seguire le leggi di Plateau (nei nodi confluiscono preferenzialmente tre ramificazioni ruotate tra loro di 120°).



11 / Sopra. Effetti sul comportamento globale conseguenti la variazione del parametro *SO* che regola la distanza di posizionamento degli organi di senso del chemioattrattore (*SO* 30 in alto, *SO* 5 in basso).

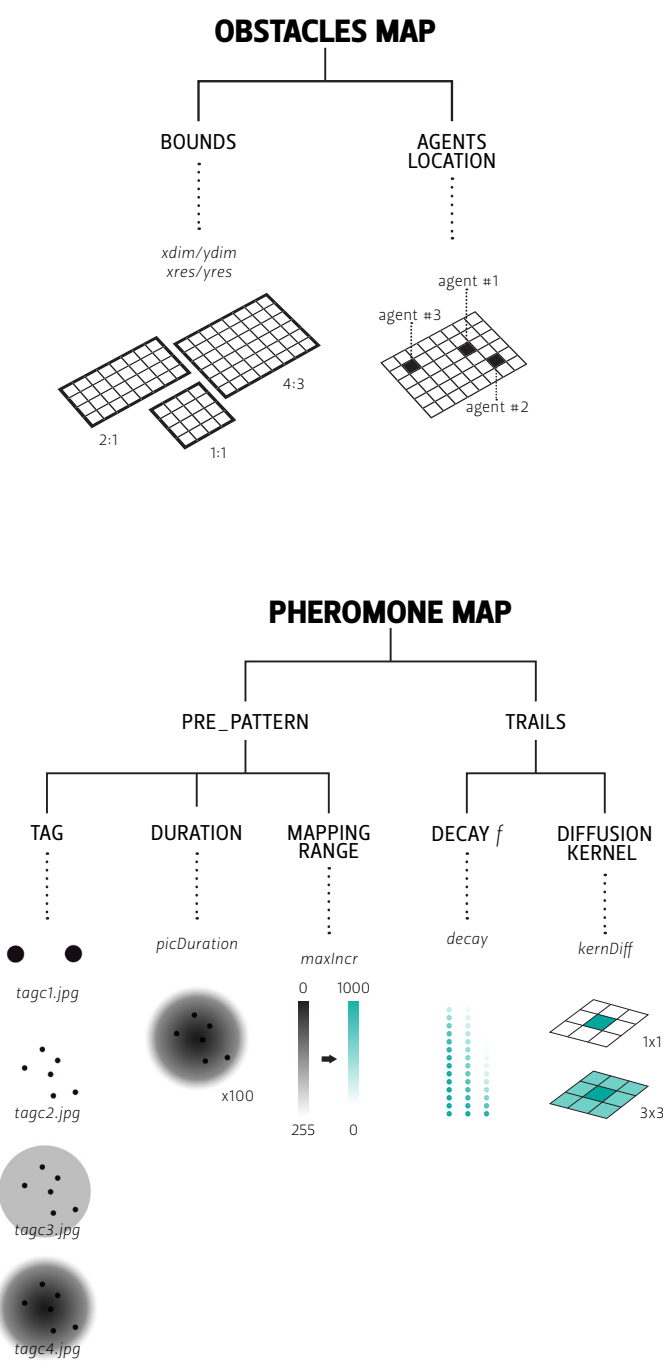
12 / A sinistra. Evoluzione dei pattern stigmergici a partire da differenti configurazioni del *pre-patterning* (concentrazioni di chemioattrattore delle prime immagini a sinistra).

13 / E' un problema di ottimizzazione combinatoria. Dato un numero di punti, l'albero di Steiner rappresenta la distribuzione di materia minima necessaria a connettere tutti i punti.

14 / J. Jones, op.cit.

Si propone a questo punto una lettura schematica delle principali caratteristiche fin'ora descritte che rivelano l'approccio *multi-layer* del modello simulato. I layer sono mappe di informazione che riportano in modo dinamico l'evoluzione del sistema nei suoi elementi costitutivi.

La *mappa degli ostacoli* tiene traccia della posizione attuale di agenti e di eventuali ostacoli come i confini del playground. La *mappa feromonica* (il chemioattrattore, secondo la trattazione di Jones) riporta la traccia che 'guida' il sistema stigmergico.

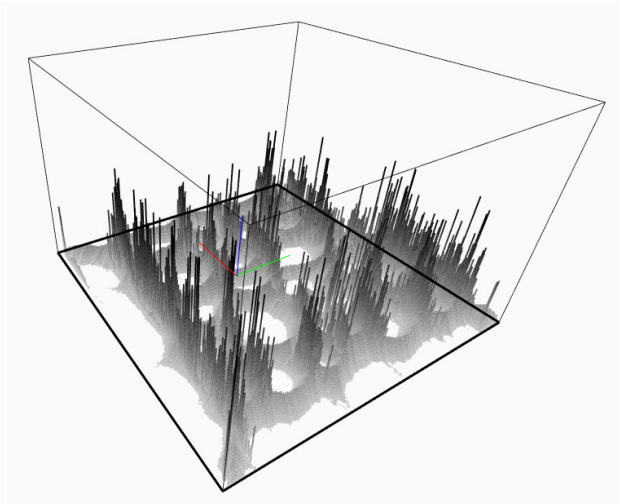
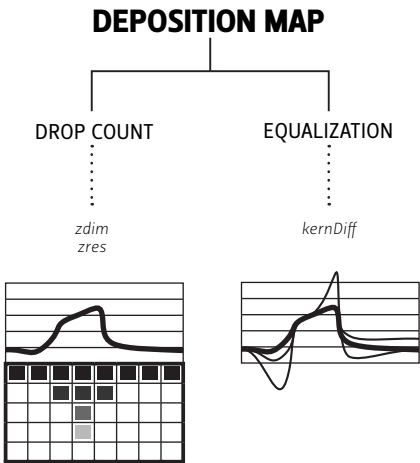


Al modello della simulazione che vede gli agenti operare in termini motori e cognitivi entro uno spazio a due dimensioni, strutturato nei layer sopra descritti, viene integrato infine il modello computazionale che visualizza il processo di formazione materiale proposto nel capitolo precedente. La crescita della costruzione di acetato di sodio rilasciato dai robot diviene finalmente parte integrante della simulazione, fornendo così alla ricerca il necessario strumento di verifica delle potenzialità espressive e spazializzanti del sistema.

Il playground diventa un parallelepipedo contenente una matrice 3D di voxel di materia, secondo le modalità già discusse nel capitolo precedente su ricerca e simulazione di possibili comportamenti materiali ¹⁴.

La costruzione, in quest’ottica, diventa anch’essa una struttura dati, un ulteriore layer informativo (definito *mappa della deposizione*) che l’agente può localmente interrogare. In uno dei prossimi paragrafi, si farà cenno a questa possibilità che, pur indagata in termini di simulazione, non è pervenuta ad una formulazione hardware propriamente matura.

15 / Si accenna alla *funzione di equalizzazione*, una procedura algoritmica che evita visualizzazioni in cui prevale il carattere di puro dato (la mappa di deposizione può intendersi in termini diagrammatici come un grafico a barre a due assi, X e Y). Permette inoltre un primo trasferimento di proprietà fisiche alla nube di punti che costituisce la rappresentazione particellare del materiale depositato dai robot.



PROTOTIPAZIONE E SIMULAZIONE DI AGENTI SENSIBILI

La capacità di *interpretare* l'ambiente da parte di ciascun agente pone la necessità di dare sostanza materiale all'universo simulato entro il computer oltre che un corpo a ciascun agente (altrimenti considerato un'ente astratto adimensionale, un vettore). Si è così giunti ad un momento cruciale in cui si sono effettuate le scelte circa le caratteristiche hardware che avrebbero realizzato a tutti gli effetti le possibilità di percezione-azione dell'agente robot: nonostante la volontà di mantenersi fedeli al modello simulato di Jones, sono state necessarie delle approssimazioni che, anzi, costituiscono specificazioni di quello stesso, necessarie ad una sua applicazione incorporata, arricchita da una serie di aspetti inerenti la fisica e la materialità del sistema.

La *Embodied Embedded Cognition* (EEC) è un filone della scienza cognitiva, secondo la quale il comportamento intelligente emerge dalla reciproca interazione tra cervello, corpo e mondo.

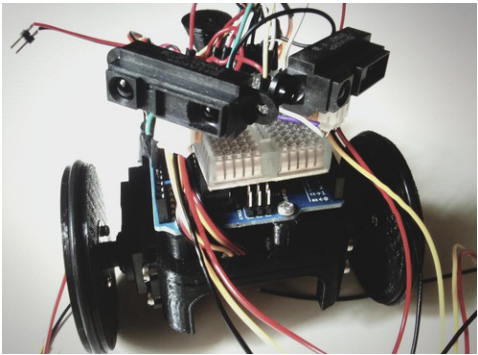
La EEC è suddivisa in due principali aspetti: *embodiement* ed *embeddedness*. La prima si riferisce allo stato omeostatico ¹⁶ interno che influenza in modo preponderante il processo cognitivo che avviene nel cervello. La seconda si riferisce al fatto che l'interazione fisica tra corpo e mondo influenza il comportamento di un organismo. Ciò diviene particolarmente evidente durante la percezione tattile. Lo stimolo che il nostro cervello riceve dal dito è fortemente influenzato dalla percezione che il nostro corpo, in quel momento, manifesta e media attraverso processi omeostatici di termoregolazione (per esempio, la percezione della temperatura sul nostro braccio influenza fortemente la sensorialità tattile che in quel momento esercitiamo). Questo campo è stato particolarmente sviluppato all'interno dell'IA (Intelligenza Artificiale) cercando di fornire alle macchine un metodo percettivo più simile a quello umano.

16 / *Omeostasi* è la tendenza naturale al raggiungimento di una relativa stabilità interna delle proprietà fisico-chimiche che accomuna tutti gli organismi viventi, per i quali tale stato di equilibrio deve mantenersi nel tempo, anche al variare delle condizioni esterne, attraverso precisi meccanismi autoregolatori.

Uno dei primi livelli di coscienza di cui dotare un certo tipo di robotica autonoma è quello che permette all'individuo di collocare sé stesso all'interno di un ambiente costituito di oggetti, alcuni coi quali interagire, altri da evitare. Rispetto questi ultimi, gli algoritmi di *obstacle avoidance* permettono alle unità robotizzate di muoversi ed operare senza che queste vengano a urtarsi reciprocamente. Dotando il primo prototipo *esplorativo*¹⁷ di una coppia di sensori Sharp GP2Y0A21YK si è potuto cominciare a lavorare con algoritmi di questo tipo, utili ad incorporare una primitiva forma di visione – essenziale per una esplorazione priva di rotta e di controllo diretto da operatore.

Lo Sharp GP2Y0A21YK0F è un sensore che permette la misurazione di distanze, costituito di combinazione integrata PSD (rilevatore sensibile di posizione), IRED (diodo ad emissione IR) e di un circuito per processare il segnale. Il grado di riflessione delle superfici, la temperatura ambientale e la durata dell'operatività possono alterare la rilevazione a causa del metodo di triangolazione adottato dal sensore. Il segnale di output (analogico) restituito dal sensore è un voltaggio che esprime la distanza rilevata: 3.1V corrispondono a 10 cm, mentre 0.4V corrispondono a 80 cm. E' così piuttosto semplice combinare i due segnali provenienti dalla coppia di sensori simulando una primitiva forma di visione binoculare.

Si sono definite due soglie di distanze rilevabili, una *minThresholdDistance*, al disotto della quale reagire con movimenti rapidi per evitare collisioni imminenti con oggetti vicini, ed una *maxThresholdDistance*, per correzioni delle traiettorie più morbide in presenza di ostacoli rilevati ma lontani.

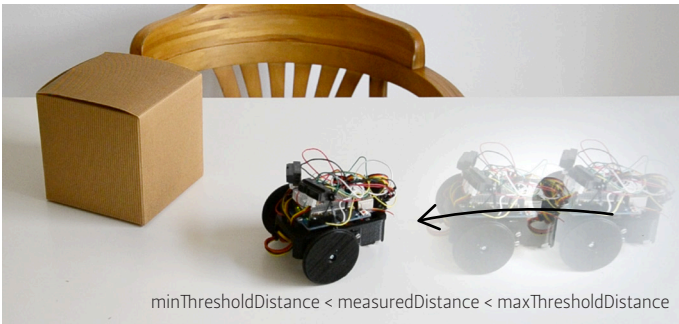


17 / Il primo prototipo, utilizzato per avviare uno studio preliminare ai comportamenti robot programmati con codice, definito *esplorativo*. Si tratta di un piccolo rover stampato in PLA per mezzo di una 3Dprinter messa a disposizione da MakeInBo. Il modello 3D dello chassis, concesso con licenza *Creative Commons–Share Alike*, è disponibile sulla piattaforma Thingiverse. Ben visibili, i due sensori Sharp GP2Y0A21YK permettono una pseudo-visione binoculare al robot.

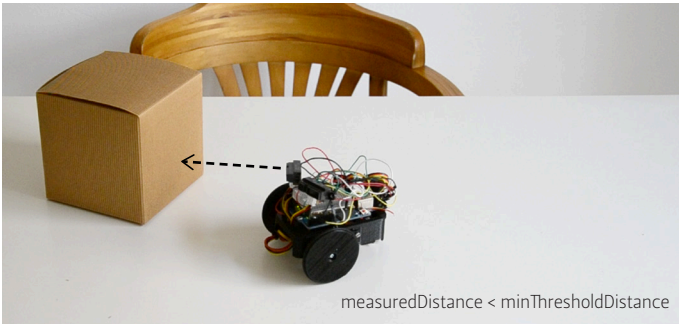
Il numero delle permutazioni possibili dai tre stati della variabile *measuredDistance* :

- 1. *measuredDistance* < *minThresholdDistance*
- 2. *minThresholdDistance* < *measuredDistance* < *maxThresholdDistance*
- 3. *measuredDistance* < *maxThresholdDistance*

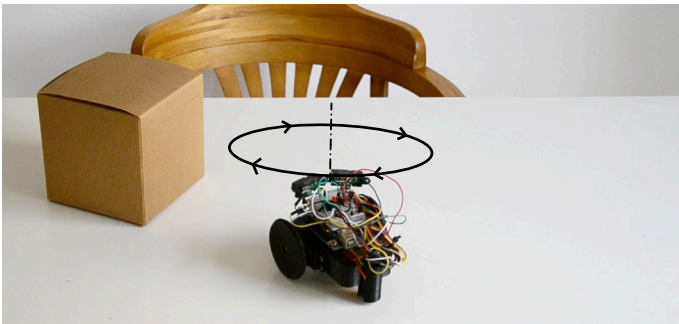
è pari a 3 fattoriale, ovvero $3! = 3 \times 2 \times 1 = 6$.
Ciascuna delle sei possibili coppie di letture rilevabili, possono attuare nel robot una risposta motoria coerente con la minore o maggiore urgenza di modifica del proprio percorso, evitando così collisioni ed urti con oggetti fissi o in movimento ¹⁸⁻²¹.



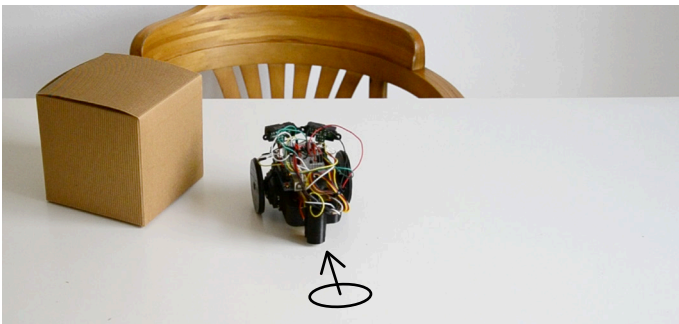
18 / L'unità sta avvicinandosi all'ostacolo. Si noti la lieve curvatura assunta dalla traiettoria del robot: il sensore ha già rilevato la presenza dell'ostacolo, ma non ci si trova ancora 'pericolosamente' vicino. In questa condizione si opta per una sterzata morbida che potrebbe fare evitare la collisione.



19 / Se la manovra intrapresa non è sufficiente ad evitare la collisione (il sensore rileva un valore inferiore alla minima soglia di distanza ammessa), occorre procedere ad un brusco cambio di traiettoria.

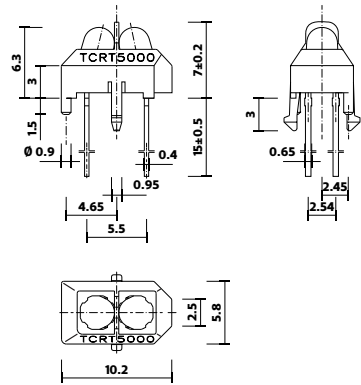
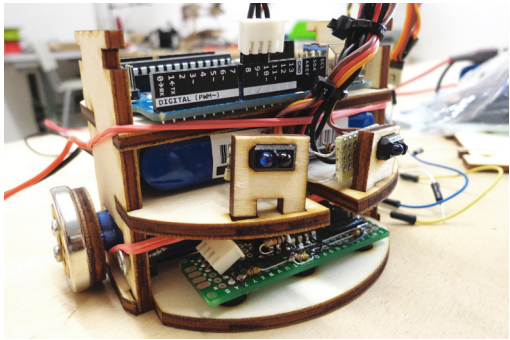


20 / Si fa effettuare al robot una rotazione sul posto di un angolo di deviazione stabilito.

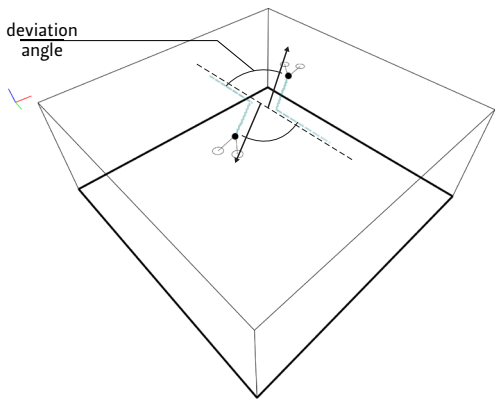
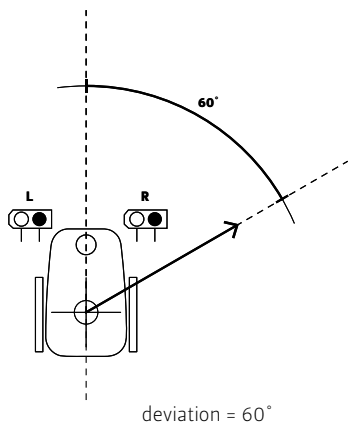


21 / Infine, qualora i sensori confermino la libertà di movimento, il robot riprende il suo moto rettilineo.

I modelli successivi al primo prototipo *esplorativo*, nel tentativo di perseguire l'obiettivo di costruire un numero elevato di unità – e dunque il contenimento dei costi unitari per robot, hanno subito la sostituzione dei (costosi) sensori Sharp con una versione più economica di IR ²². La scelta di un diverso componente (e del conseguente risparmio) è stata compiuta tuttavia come compromesso rispetto la sensibilità dello stesso: se con lo Sharp era possibile una visione dell'ostacolo fino ad una distanza di 80 cm, con questa dotazione più economica le distanze limite non sono superiori ai 15 cm. Questa drastica restrizione della visibilità del robot è stata in fase di progetto ritenuta sufficiente per manovrare in sicurezza le unità, evitando cioè urti tra i robot (che si sarebbero potuti avere da prevedibili ritardi di manovra). L'adeguamento di questa scelta hardware a livello software, più che indurre conseguenze strutturali del codice, ha notevoli ripercussioni in termini di fenomeno emergente collettivo, che saranno a breve discussi. La simulazione ha quindi incorporato questa variabilità come un campo parametrico da esplorare, superando il vincolo costituito dalla scelta di un particolare sensore IR. Il modello di azione-reazione inizialmente considerato prevede l'immediato allontanamento dall'ostacolo rilevato, dunque si interviene sull'intensità della sterzata ottenuta con un'opportuna accelerazione dei motori collegati alle ruote. L'agente simulato ²³ modifica la propria direzione di movimento con incrementi di rotazione della propria velocità (una grandezza vettoriale), senza mai fermarsi ²⁴.

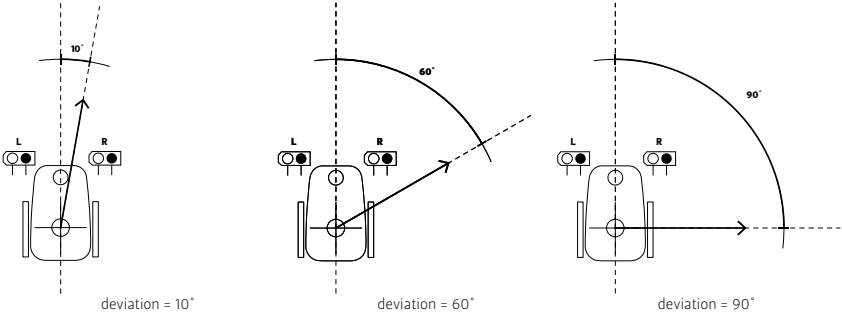


- 22 / I prototipi intermedi vedono la sostituzione dei sensori IR Sharp con dei più economici TCRT5000.
- 23 / (in basso) La simulazione della strategia di *obstacle avoidance* è ottenuta mediante l'incremento di un angolo (di deviazione) della traiettoria impegnata attualmente dall'agente. Il parametro coinvolto è *RA_pos* e si conserva costante per ogni agente durante le iterazioni di sistema.
- 24 / Si precisa questo aspetto che costituisce una variazione dell'algoritmo di Jones (a cui ci si atterrà più fedelmente in simulazioni illustrate nel seguito). In termini strettamente procedurali, l'agente nel modello di Jones, dopo aver rilevato la presenza di ostacoli sul suo percorso si ferma per la durata di un'iterazione di sistema, procedendo in quella successiva ad una sterzata variabile di volta in volta entro un intervallo di valori stabilito dal parametro *RA*.



25 / In basso, sono illustrate le sequenze di sterzata nell'ambiente simulato al variare del parametro *RA_pos*.

Variando l'enità della rotazione, espressa nell'algoritmo dal parametro *RA_pos*²⁵, le traiettorie che definiscono i pattern stigmergici emergenti ne vengono influenzati contribuendo alla specificazione del carattere posseduto dal sistema.



La strategia appena descritta di *obstacle avoidance* ha così permesso una prima acquisizione importante per l'agente robot: la capacità percettiva di ostacoli, di quelli fissi²⁶ così come di quelli in movimento²⁷, e la capacità di modificare la propria rotta in funzione dello specifico stimolo. Il comportamento progettato a partire dalle specifiche hardware individuate è stato sperimentato in un contesto di sciame, qui ridotto a tre sole unità al fine di evitare sovraffollamenti caotici sul playground (80x125 cm²) disponibile per la sperimentazione.

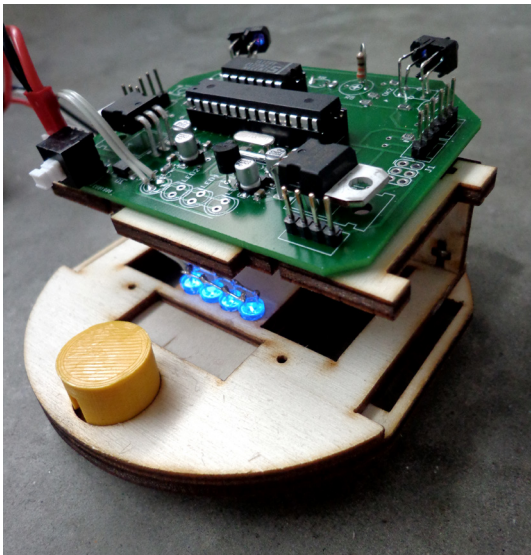
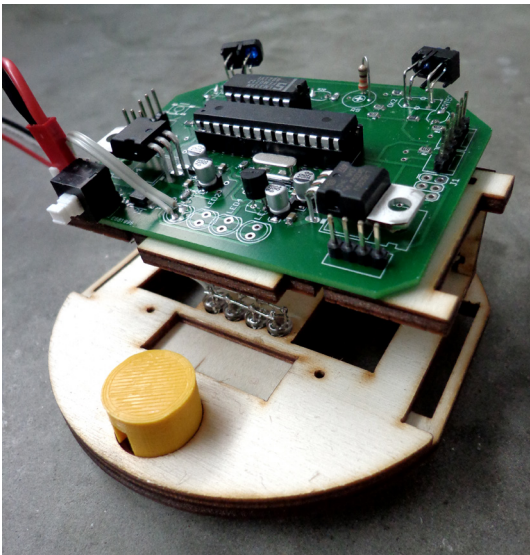
26 / Nella fotosequenza di questa pagina, il prototipo si muove da solo sul playground e ne rileva i limiti (sponde). L'autonomia di comportamento è così verificata rispetto ostacoli statici.

27 / Nella pagina accanto, il playground è popolato di altri esemplari di agenti robot. Si è questa volta verificata l'autonomia di anti-collisione rispetto ostacoli in movimento.

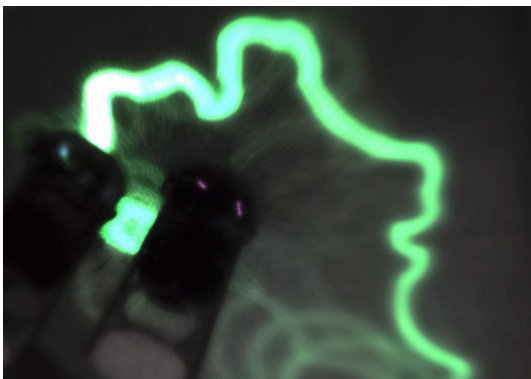




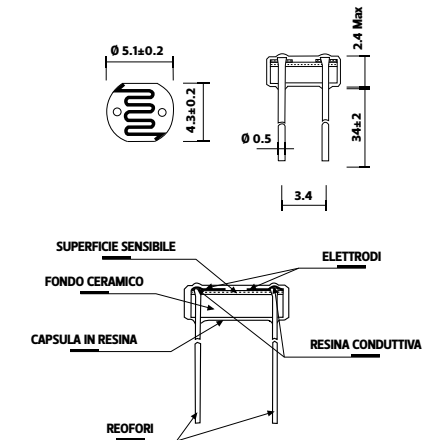
Proseguendo nel trasferimento di abilità cognitive agli agenti robot, si sono indagate le possibili realizzazioni hardware del modello chemiotattico. La matrice ambientale che ospita le variazioni di concentrazione del chemioattrattore (o feromone se si considera l'analogia delle colonie di formiche e termiti), e che abbiamo definito *layer traccia*, è proiettato direttamente sul soffitto metallico del playground realizzato per l'applicazione robot.



Sfruttando le caratteristiche di fotoluminescenza del gel con cui è stato rivestito il piano metallico, è possibile irradiare scie luminose che svaniscono finché un ulteriore stimolo luminoso riattiva i fosforeni dispersi nel gel. In particolare, è la radiazione ultravioletta (UV) la porzione dello spettro luminoso che stimola maggiormente l'effetto fosforescente. Si sono perciò dotate le unità robot di 4 LED ultravioletti, disposti in linea per aumentare l'ampiezza della banda luminosa proiettata ²⁸. L'accensione e lo spegnimento dei LED, fornisce ai robot l'intenzionalità circa il rilascio di queste scie luminose che –come tracce feromoniche– rimangono temporanee informazioni distribuite nell'ambiente. L'analogia con il sistema biologico manca però la piena realizzazione senza la capacità dei robot di percepire questo stimolo.



28 / La batteria di LED UV è disposta inferiormente al prototipo robot e alloggiata nei fori ricavati sulla base di compensato tagliato con una fresa laser a controllo numerico. Il gel fosforescente –che riveste la lastra in ferro a cui si agganciano i robot– permette l'emersione temporanea di scie luminose quando i LED si muovono a bordo delle unità. Queste tracce di luce sono tanto più distinguibili quanto maggiore è il contenimento dell'illuminazione ambientale.



29 / Le LDR (quelle utilizzate sono le PGM5537 della *Token Electronics*) offrono valori di resistenza inversamente variabili con l'intensità della luce incidente. La sensibilità relativa di questi sensori è variabile inoltre con la lunghezza d'onda luminosa che incide sulla superficie sensibile.

Le fotocellule o *Light-Dependent Resistor (LDR)* sono fotoresistori, ovvero resistenze elettriche il cui valore è variabile con l'intensità della luce incidente ²⁹. Con questi componenti si sono dotati i robot dei tre recettori di chemioattrattore che il modello di Jones dispone frontalmente sul suo agente simulato: è dunque possibile la percezione dello stimolo luminoso che viene mappato sul piano metallico verniciato con gel fosforescente.

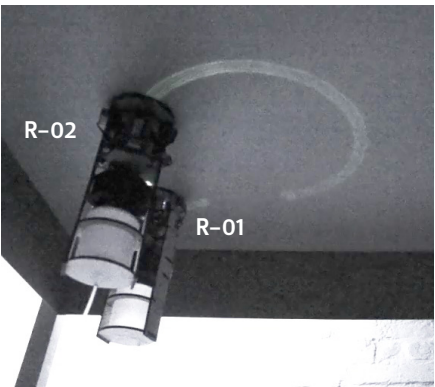
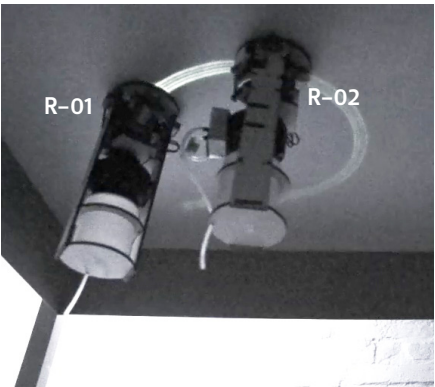
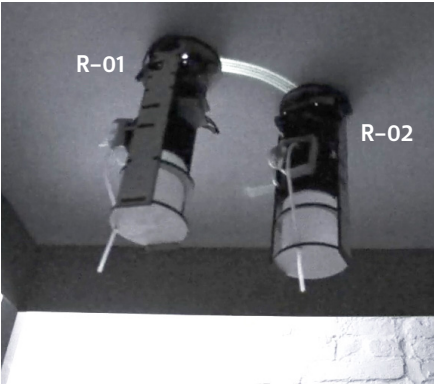
Si fa notare, tuttavia, che il set-up appena descritto, presuppone come requisito fondamentale l'operatività in condizione di luminosità ambientale controllata, ovvero in condizioni di penombra, se non addirittura di buio totale. Tale condizione è indispensabile in quanto, in condizione di luminosità diffusa, una vasta regione della superficie verniciata verrebbe 'eccitata' dalla radiazione ultravioletta (presente naturalmente nella radiazione solare ambiente). Il differenziale di luminosità tra aree illuminate selettivamente dai LED UV e aree esposte a luminosità ambientale andrebbe a ridursi drasticamente: il sensore non perderebbe dunque sensibilità rispetto la traccia luminosa intenzionalmente rilasciata da suoi simili.

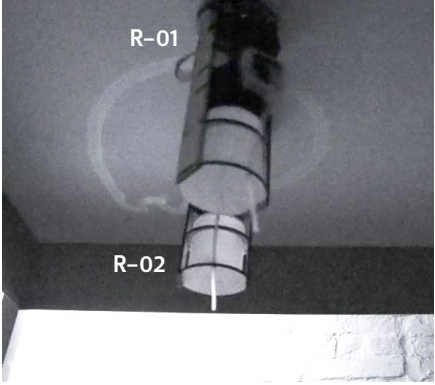
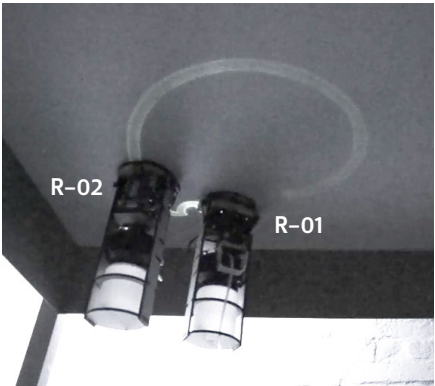
Ecco, dunque, la ragione essenziale per cui le fotosequenze che si proporranno in seguito, e che documentano la realizzazione della strategia del *line-following* stigmergico, sono state ambientate in condizione di quasi-buio.



30 / In questa e nella pagina seguente, si riporta la fotosequenza del comportamento *line-following* codificato nell'unità R-02. L'unità R-01, che rilascia la scia illuminando la sua batteria di LED UV, si muove liberamente sul playground evitando di urtare le pareti limite (esibendo il comportamento codificato dell'*obstacle-avoidance*).

La strategia di *line-following* è stata così incorporata nell'agente robot. Nel piano sequenza illustrato in queste due pagine, sono stati programmati due unità con codici diversi. Il primo, indicato in figura con R-01, mantiene attivati i LED UV così da tracciare costantemente la scia luminosa. Dietro di lui, viene inizialmente posizionata l'unità R-02, programmata per ricercare e seguire la scia luminosa, senza però rilasciarla³⁰. Il comportamento viene verificato con successo. La circolarità delle traiettorie è dovuta ad una difficoltà riscontrata durante tutte le prove pratiche sperimentate: la ragione, come riportato nelle considerazioni finali della ricerca, risiede nella mancanza di un meccanismo di retroazione (*encoder*) che informi il controllore sull'effettiva rotazione compiuta dai microservo che controllano il movimento dell'unità robot. Si produce così una rotazione differenziale tra i motori collegati alle ruote destra e sinistra: il prevalere di un motore sull'altro provoca una curvatura della traiettoria seguita dal robot. Sempre in ragione di questa importante mancanza, si rilevano velocità variabili per le singole unità robot. Nella prova qui illustrata, l'unità R-01 –leggermente più veloce di R-02– allontanandosi progressivamente da R-02, lascia disponibile a quest'ultima una scia più flebile, 'svanita' nel crescente distacco rispetto i LED illuminanti di R-01. In conclusione, l'unità R-02, non appena la scia sarà invisibile ai sensori LDR, interromperà l'inseguimento di R-01, mantenendo una propria rotta, fino al rilevamento di una nuova scia luminosa.



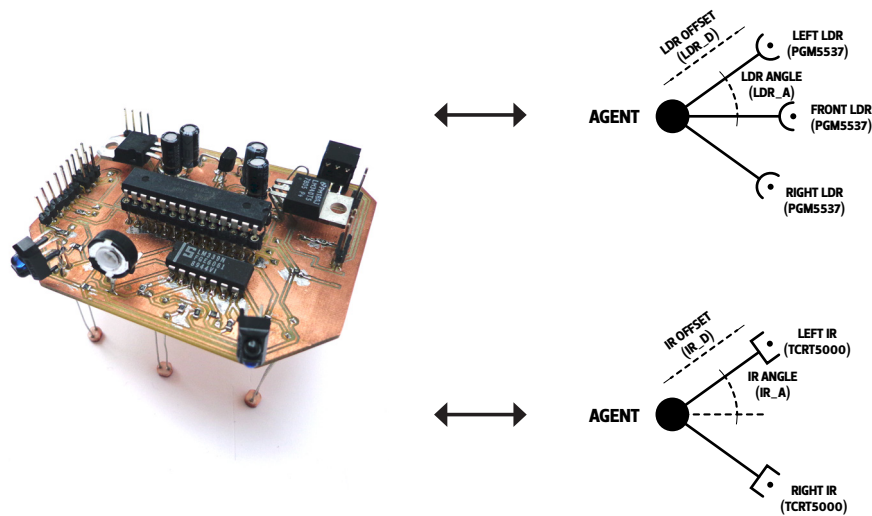


Già con questa minima dotazione sensoristica, che è influenzata dal modello di *agency* proposto da Jones e che, allo stesso tempo, specifica i limiti percettivi dell'agente simulato , sono stati effettuati studi comparativi di tipo parametrico per poter apprezzare l'emergenza del comportamento di sciame.

La variazione, entro classi di intervalli numerici, di alcune variabili (tra cui quelle relative ai sensori appena descritti) si ripercuote sulle aggregazioni emergenti entro lo sciame di agenti robot.

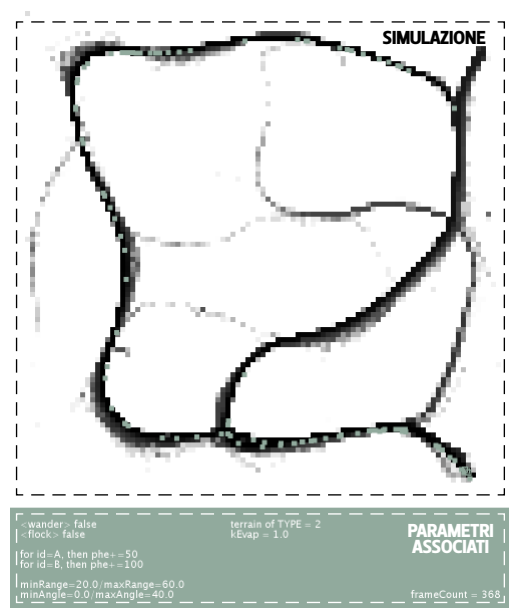
In questo senso, il ruolo della simulazione ³¹, che in prima istanza imita le caratteristiche '*attuali*' della configurazione hardware presa in esame con la prototipazione, offre indicazioni utili circa le caratteristiche '*desiderabili*' che consentirebbero l'emergenza del macro-comportamento simulato.

31 / L'embodiement dei caratteri morfologici dell'agente simulato impone l'adeguamento del sistema di parametri che governano la simulazione dei comportamenti individuali circa le tolleranze e sensibilità delle componenti hardware selezionate.

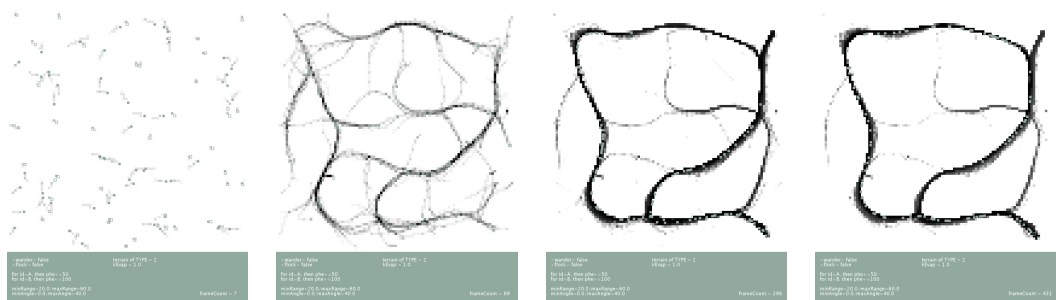
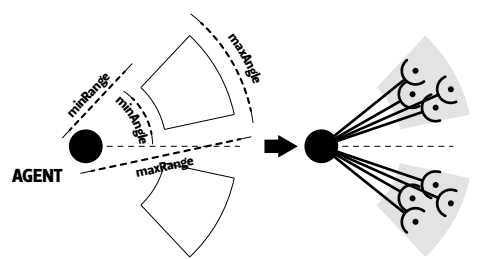


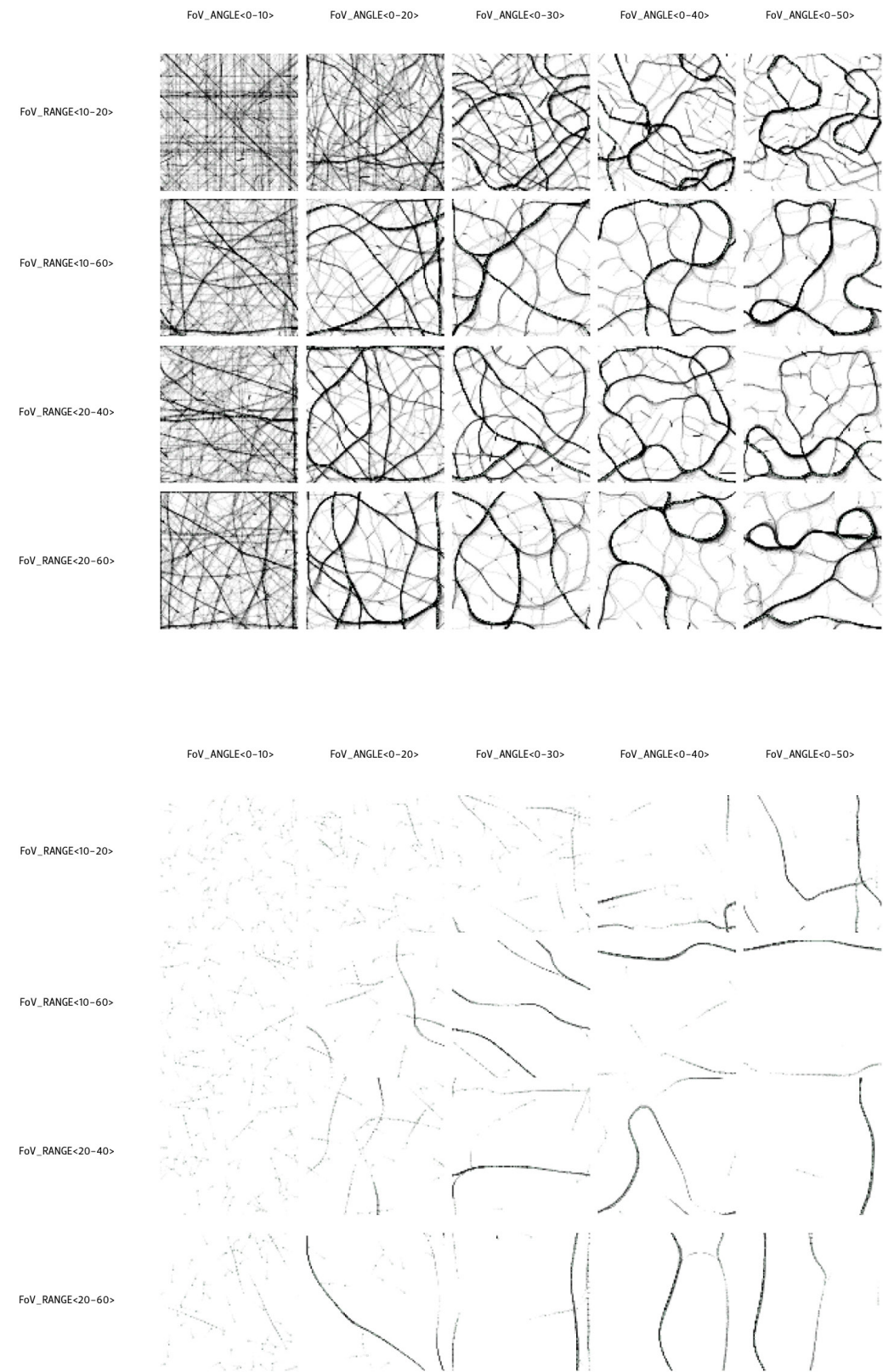
Le serie di simulazioni elaborate visualizzano sullo stesso livello gli agenti (una popolazione di 40 individui) e la mappatura del chemioattrattore che evolve e decade nel tempo in funzione del parametro *kEvap*³². La morfologia dell'agente è controllata da alcuni parametri che specificano la posizione dei sensori di lettura LDR: si è proposta la doppia coppia di parametri *minRange-maxRange* e *minAngle-maxAngle* con cui viene definita la visuale (*Field of View - FoV*) che permette all'agente la ricerca di chemioattrattore³³. Con 5 possibili abbinamenti dei parametri inerenti l'angolo di visuale (0° - 10°; 0° - 20°; 0° - 30°; 0° - 40°; 0° - 50°) e altri 4 abbinamenti per i parametri di intervallo di visuale (10-20; 10-60; 20-40; 20-60), si sono esplorate le permutazioni possibili. Si è inserita una ulteriore variabilità al sistema distinguendo l'intensità di chemioattrattore rilasciato dall'agente in funzione del proprio stato di 'eccitamento' (indotto dal

rilevamento di chemioattrattore): in caso di avvenuto rilevamento, l'agente rilascia una quantità di chemioattrattore maggiore di quanta ne avrebbe rilasciata in assenza di rilevamento. Le simulazioni si sviluppano in 500 iterazioni. I quadri riassuntivi proposti nelle pagine seguenti riportano l'evoluzione del *layer traccia* al termine della simulazione, ovvero la cinquecentesima iterazione di sistema (*frame*). Una parte delle simulazioni considera gli effetti sull'evoluzione del sistema generati da particolari condizioni 'al contorno', come la presenza di confini contenenti l'area di simulazione. Dove non specificato, l'ambiente di simulazione è del tipo *toroidale*, per cui l'agente uscente dall'area di simulazione vi rientra in posizione diametralmente opposta a quella di uscita. Infine, si sono valutati comportamenti del sistema che ibridano il modello stigmergico con il modello di *flocking* alla Reynolds.



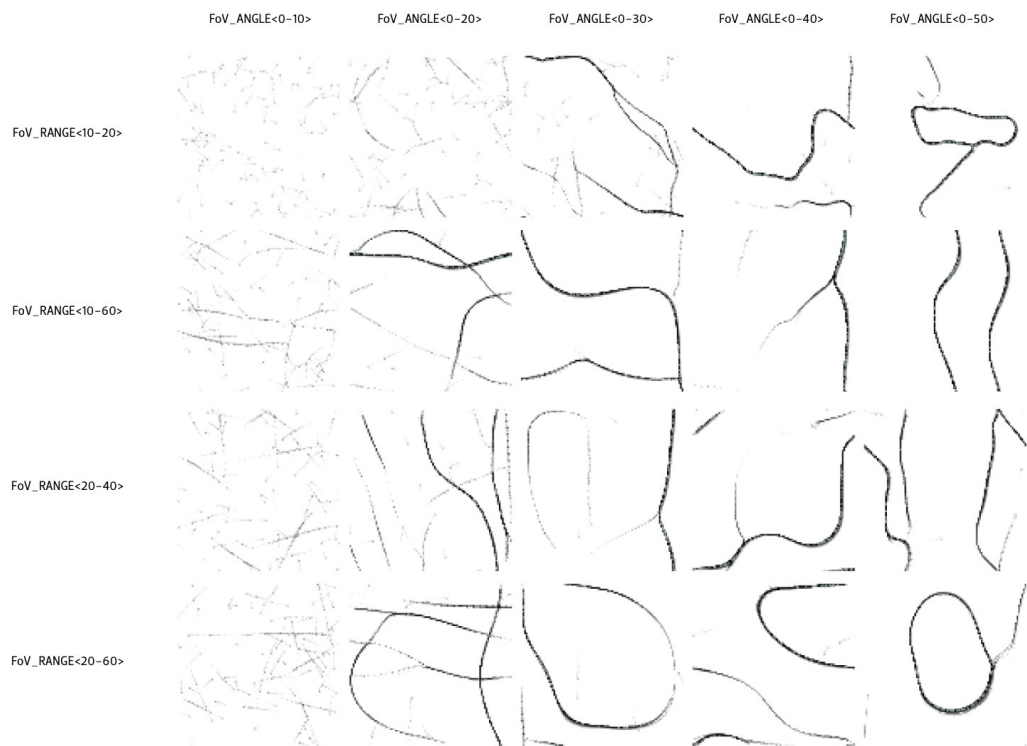
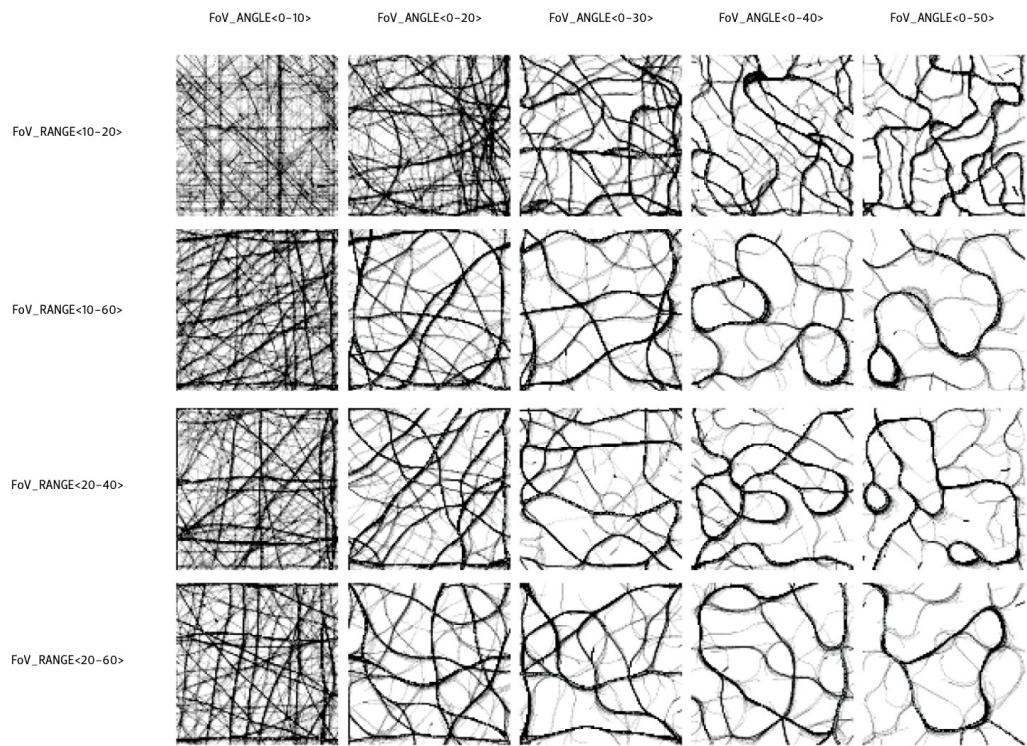
- 32 / Una schermata dell'applicazione che simula il sistema di agenti definiti da parametri morfologici (*minAngle*, *maxAngle*, *minRange*, *maxRange*) e ambientali (*kEvap*). In basso, si nota la progressiva evoluzione del pattern stigmergico percepibile come gradiente di chemioattrattore (in nero).
- 33 / Definizione diagrammatica della visuale (*field of view - FoV*) secondo la morfologia descritta.



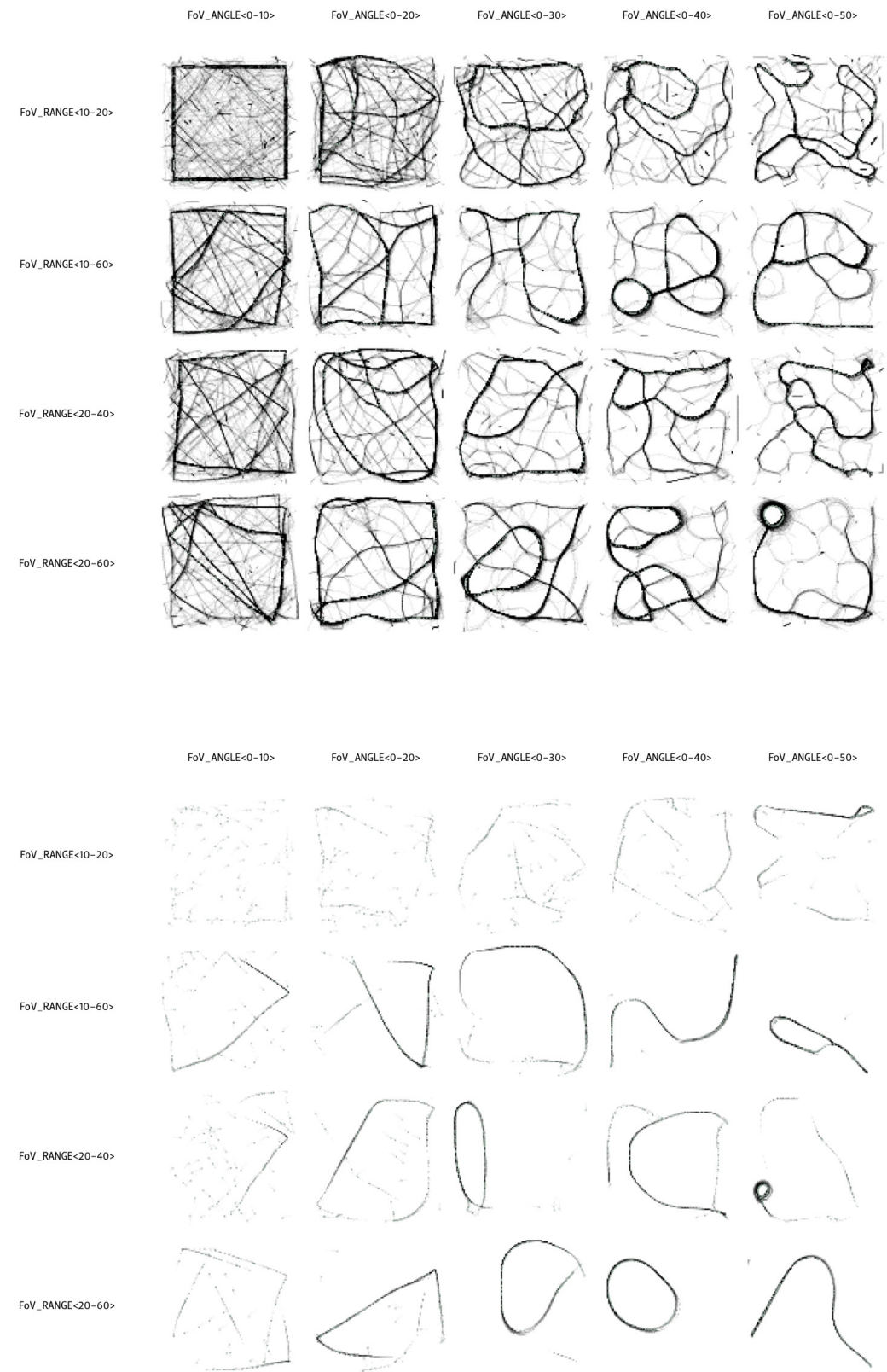


34 / Plain_TO_k0.01-10.0

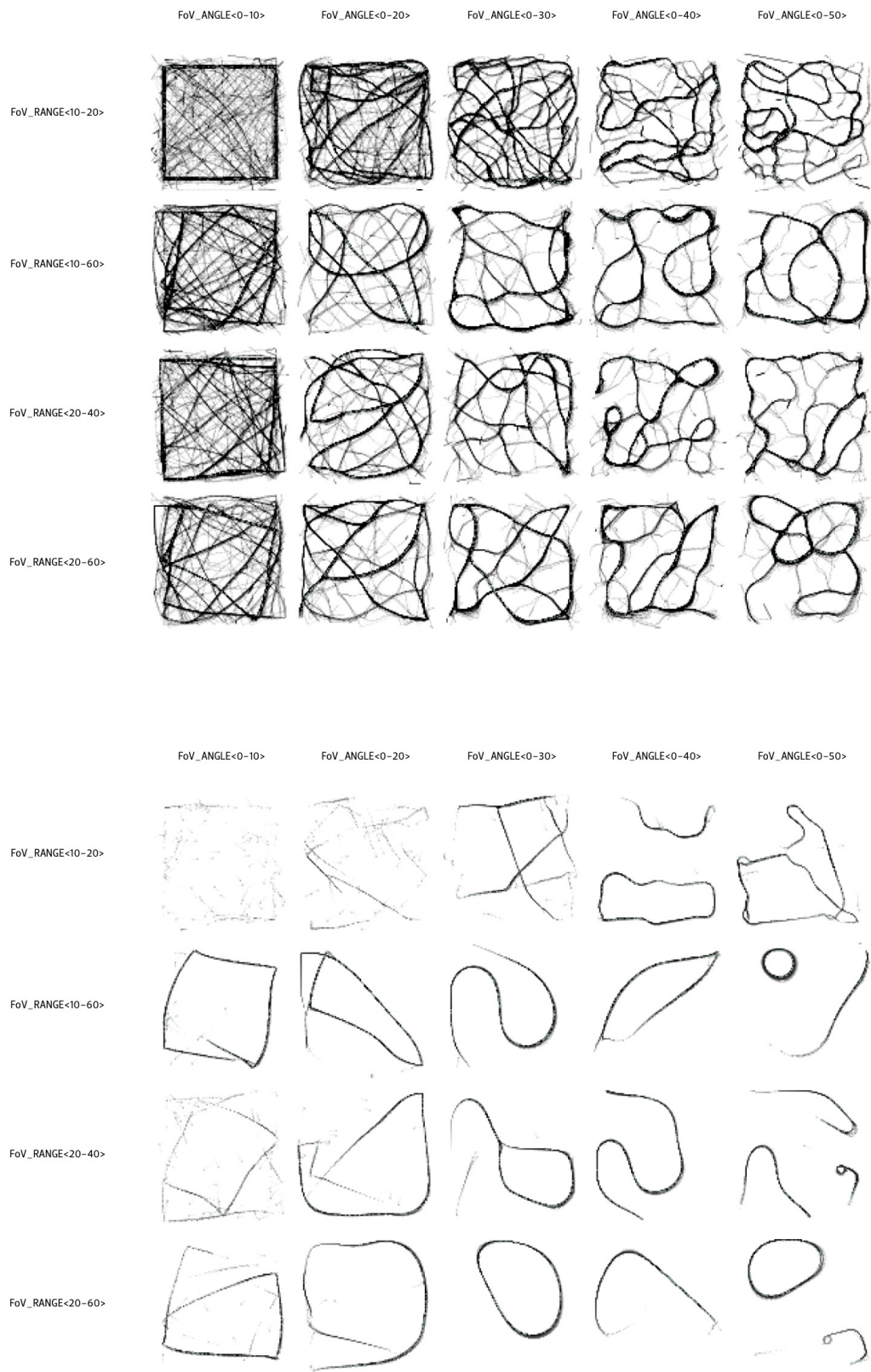
Lo spazio di manovra è per questi due quadri del tipo *toroidale*. In caso di rilevamento di chemioattrattore, l'agente reagisce rilasciando la stessa quantità di chemioattrattore che avrebbe rilasciato in caso di mancato rilevamento. Nel quadro superiore l'evaporazione delle tracce di chemioattrattore è lenta ($k_{Evap} = 0.01$). Nel quadro inferiore, invece, si ha evaporazione rapida ($k_{Evap} = 10.0$).



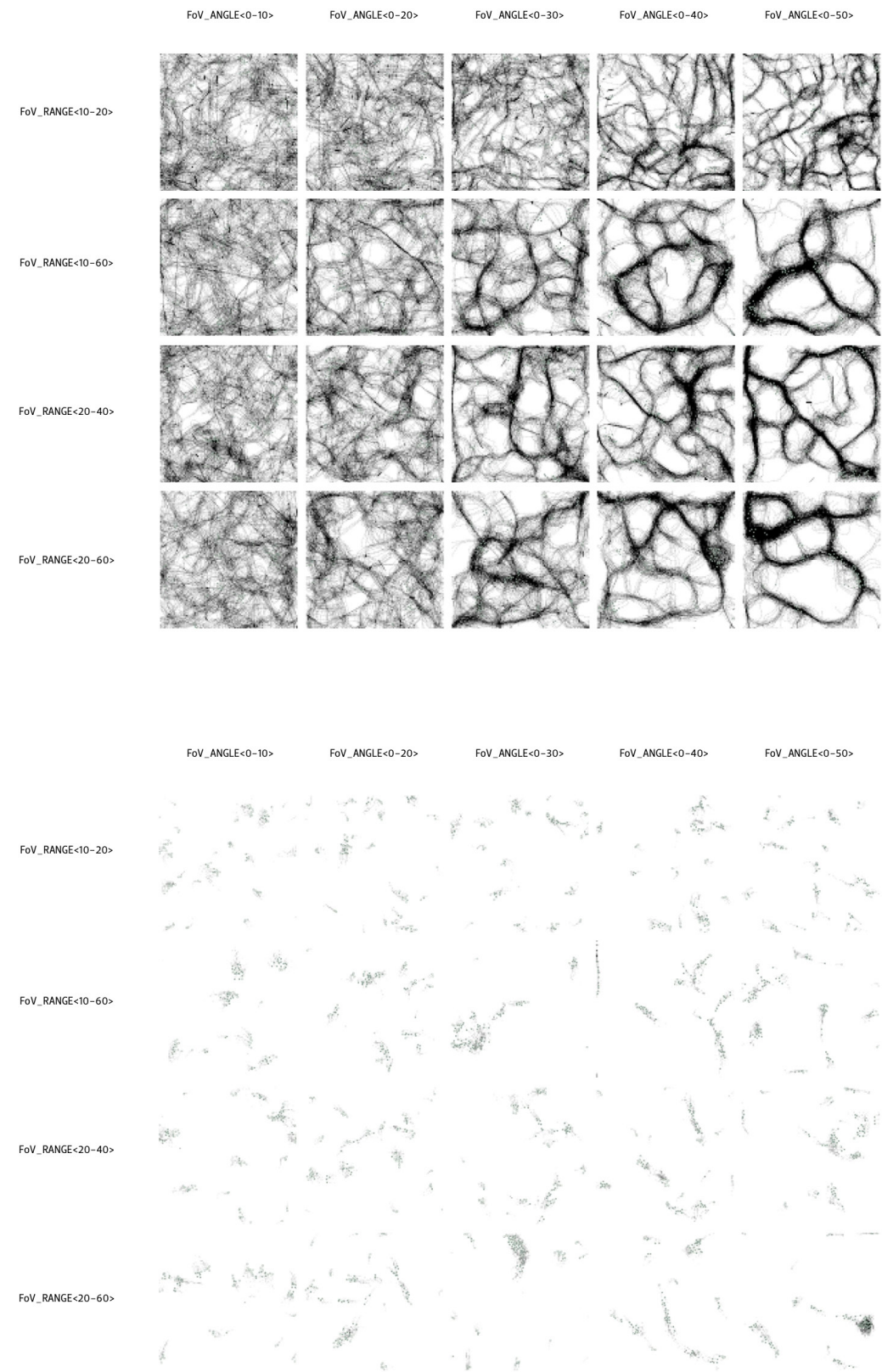
35 / Plain_T2_k0.01-10.0
Lo spazio di manovra è per questi due quadri del tipo *toroidale*. In caso di rilevamento di chemioattrattore, l'agente reagisce rilasciando una quantità di chemioattrattore doppia rispetto quella che avrebbe rilasciato in caso di mancato rilevamento. Nel quadro superiore l'evaporazione delle tracce di chemioattrattore è lenta ($k_{Evap} = 0.01$). Nel quadro inferiore, invece, si ha evaporazione rapida ($k_{Evap} = 10.0$).



36 / Plain+Bouncing_T0_k0.01-10.0
Lo spazio di manovra per questi due quadri è vincolato all'area della simulazione. In caso di rilevamento di chemioattrattore, l'agente reagisce rilasciando la stessa quantità di chemioattrattore che avrebbe rilasciato in caso di mancato rilevamento. Nel quadro superiore l'evaporazione delle tracce di chemioattrattore è lenta ($kEvap = 0.01$). Nel quadro inferiore, invece, si ha evaporazione rapida ($kEvap = 10.0$).

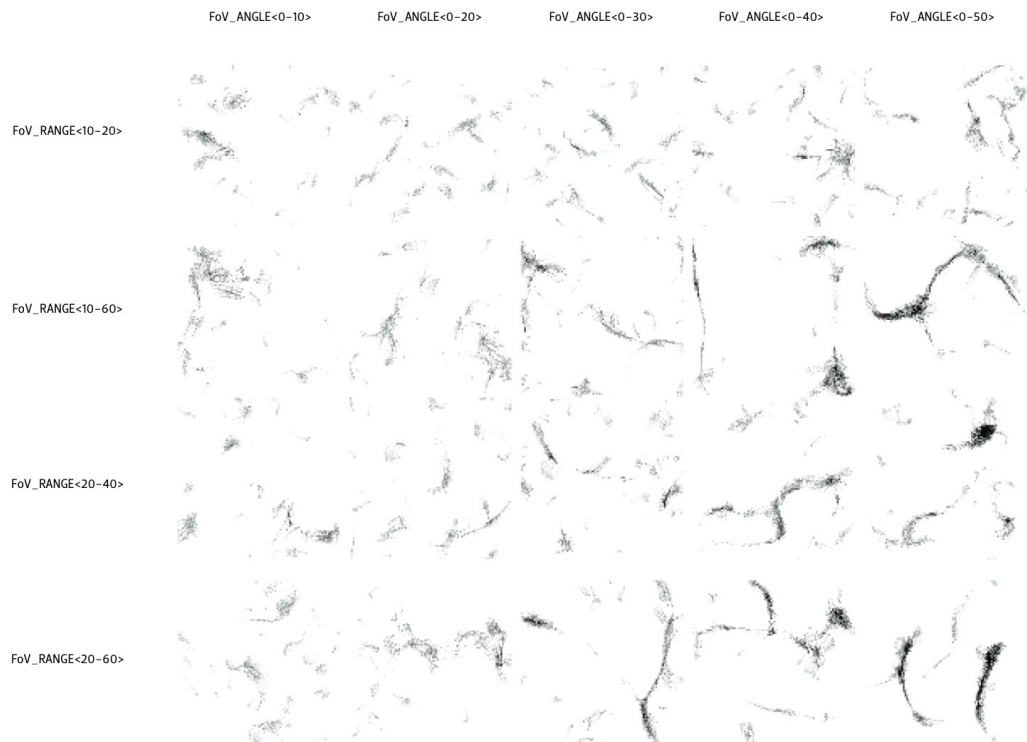
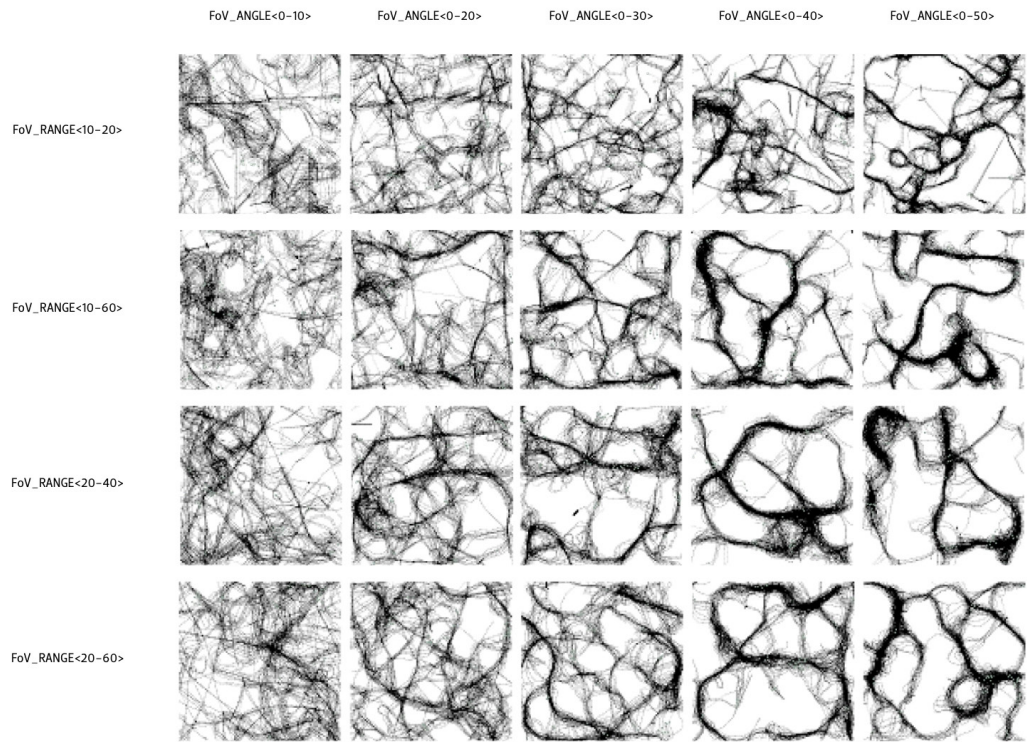


37 / Plain+Bouncing_T2_k0.01-10.0
Lo spazio di manovra per questi due quadri è vincolato all'area della simulazione. In caso di rilevamento di chemioattrattore, l'agente reagisce rilasciando una quantità di chemioattrattore doppia rispetto quella che avrebbe rilasciato in caso di mancato rilevamento. Nel quadro superiore l'evaporazione delle tracce di chemioattrattore è lenta ($k_{Evap} = 0.01$). Nel quadro inferiore, invece, si ha evaporazione rapida ($k_{Evap} = 10.0$).



38 / +Flock_T0_k0.01-10.0

Lo spazio di manovra è per questi due quadri del tipo *toroidale*. In caso di rilevamento di chemioattrattore, l'agente reagisce rilasciando la stessa quantità di chemioattrattore che avrebbe rilasciato in caso di mancato rilevamento. Il modello di comportamento è ibrido: la stigmergia pura viene mediata da *flocking* alla Reynolds. Nel quadro superiore l'evaporazione delle tracce di chemioattrattore è lenta ($k_{Evap} = 0.01$). Nel quadro inferiore, invece, si ha evaporazione rapida ($k_{Evap} = 10.0$).

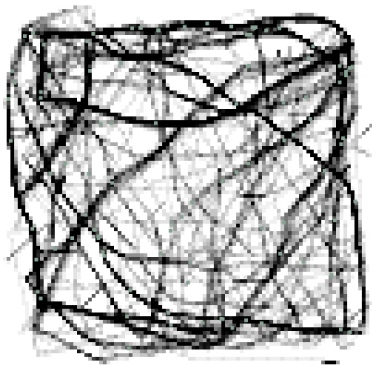


39 / +Flock_T2_k0.01-10.0
Lo spazio di manovra è per questi due quadri del tipo *toroidale*. In caso di rilevamento di chemioattrattore, l'agente reagisce rilasciando una quantità di chemioattrattore doppia rispetto quella che avrebbe rilasciato in caso di mancato rilevamento. Il modello di comportamento è ibrido: la stigmergia pura viene mediata da *flocking* alla Reynolds. Nel quadro superiore l'evaporazione delle tracce di chemioattrattore è lenta ($kEvap = 0.01$). Nel quadro inferiore, invece, si ha evaporazione rapida ($kEvap = 10.0$).

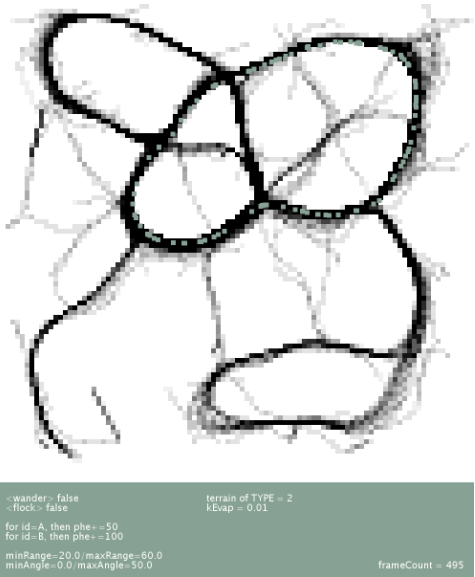
L'evoluzione nello spazio e nel tempo dei pattern definiti dal *layer traccia*, oltre a guidare in modo indiretto il sistema, è testimonianza delle posizioni che sono state occupate dagli agenti nel corso della simulazione. Le concentrazioni di chemioattrattore sono quindi legate alle densità di passaggio degli agenti e, aggiungendo un pizzico di intenzione architettonica a questa catena di eventi, a queste densità si potrebbero associare le distribuzioni di materiale depositato: in altri termini, la materia potrebbe organizzarsi grazie ai movimenti guidati dal sistema stigmergico, e potrebbe farlo in uno spazio tridimensionale aggiungendo una dimensione al modello fin qui simulato.

Ecco allora il valore dell'esplorazione parametrica condotta sul sistema a due dimensioni: visualizzando l'evoluzione del pattern stigmergico permesso dalla variazione di una serie di parametri associati alla morfologia dell'agente, si evidenziano alcuni schemi a cui il sistema converge più interessanti di altri ⁴⁰. Caratteristiche di reticolarità, connessione e addensamento sono esibite dal sistema quando i parametri che lo definiscono –inizialmente liberi di assumere qualsiasi valore– vengono modulati e contenuti entro range stabiliti ⁴¹⁻⁴³.

La deduzione di parametri morfologici 'promettenti' (in vista di un'accrescimento tridimensionale) serve così a guidare e correggere le scelte della sensoristica, tentando di far convergere gradualmente *risultato atteso* –la costruzione ad opera di agenti simulati– e *risultato ottenuto* –la costruzione ad opera di agenti robot.



40 / Questo è un chiaro esempio di risultato caotico che, pur coerente con la struttura stigmergica impostata, non offre margini di sviluppo interessanti.



41 / plain+bounding_T2_k0.01
[minRange20_maxRange60; minAngle0_maxAngle50]

Isolando i pattern che tendono nel tempo a rinforzare percorsi reticolari e cellulari, interessanti perchè concentrano i movimenti degli agenti-robot su porzioni circoscritte del playground, si scopre l'importanza della modulazione dei parametri SA e SO nell'emersione di agglomerati a rete. Si tratta dei parametri che dotano gli agenti di 'visione' rispetto il chemioattrattore o traccia feromonica. Affinchè si abbia questa tendenza, è importante impostare valori elevati di *maxRange* (si tratta della massima distanza alla quale l'agente percepisce la presenza o meno dello stimolo chemiotattico). L'ampiezza della visuale –la variabile *maxAngle*– è decisiva nella stessa misura.

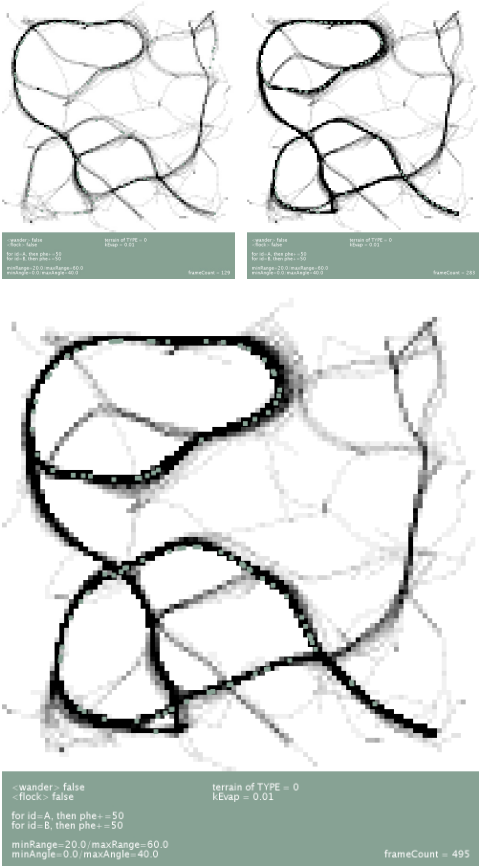
42 / plain+bounding_T2_k10.0
[minRange20_maxRange60; minAngle0_maxAngle50]

In questo caso, si deduce l'incidenza della rapidità di evaporazione della traccia feromonica sulla definizione di 'isole' nel pattern prodotto. Il parametro in gioco è questa volta di tipo ambientale, riguardando una caratteristica esterna all'agente simulato. Rispetto la simulazione precedente, la rapidità di evaporazione (controllata dal parametro *kEvap*) è aumentata notevolmente. Il livello di dispersione degli agenti si riduce notevolmente.



43 / plain+bounding_T0_k0.01
[minRange20_maxRange60; minAngle0_maxAngle40]

Si riesce talvolta a ricavare parametri o variabili del sistema che non hanno effetti rilevanti sull'effetto emergente. In questo caso, gli agenti dello sciame rilasciano segnale feromonico nella medesima intensità a prescindere dal rilevamento della scia. Nelle due simulazioni precedenti, al contrario, l'intensità di rilascio veniva raddoppiata se l'agente si trovava in uno stato di 'eccitamento', dunque in condizione di rilevamento scia. Non essendosi apprezzate significative influenze di questa duplice espressione comportamentale, si è proceduto nel semplificare il modello computazionale rimuovendo parametri e strutture superflui.



PROTOTIPAZIONE E SIMULAZIONE DI AGENTI COSTRUTTORI

Su ciascuna unità robot è stato realizzato l'apparato di estrusione del materiale individuato nella fase di studio sui materiali. L'acetato di sodio, come visto, è una soluzione supersatura, dunque si trova allo stato liquido. Un serbatoio da 250 ml è stato collocato a bordo del robot così da fornire un tempo –contenuto– di autonomia di lavoro. La scelta di escludere forme di alimentazione del materiale da costruzione per via diretta (condotte in sospensione che riforniscono continuamente il robot costruttore) è una necessità implicita in un set-up come quello considerato: l'autonomia di movimento sul piano di sospensione richiesta da ciascun robot porta all'esclusione di qualunque ostacolo o intralcio (come fili di alimentazione corrente o cavi di rifornimento materiale). Per la prova di concetto che si è ritenuta sufficiente a questa applicazione, non si sono sviluppati sofisticati algoritmi di cognizione che avrebbero potuto guidare l'unità robot nell'autonoma ricerca di materiale entro l'ambiente di lavoro (come invece avviene nella maggior parte delle specie che in natura costruiscono architetture a partire da materiali reperibili nell'ambiente).

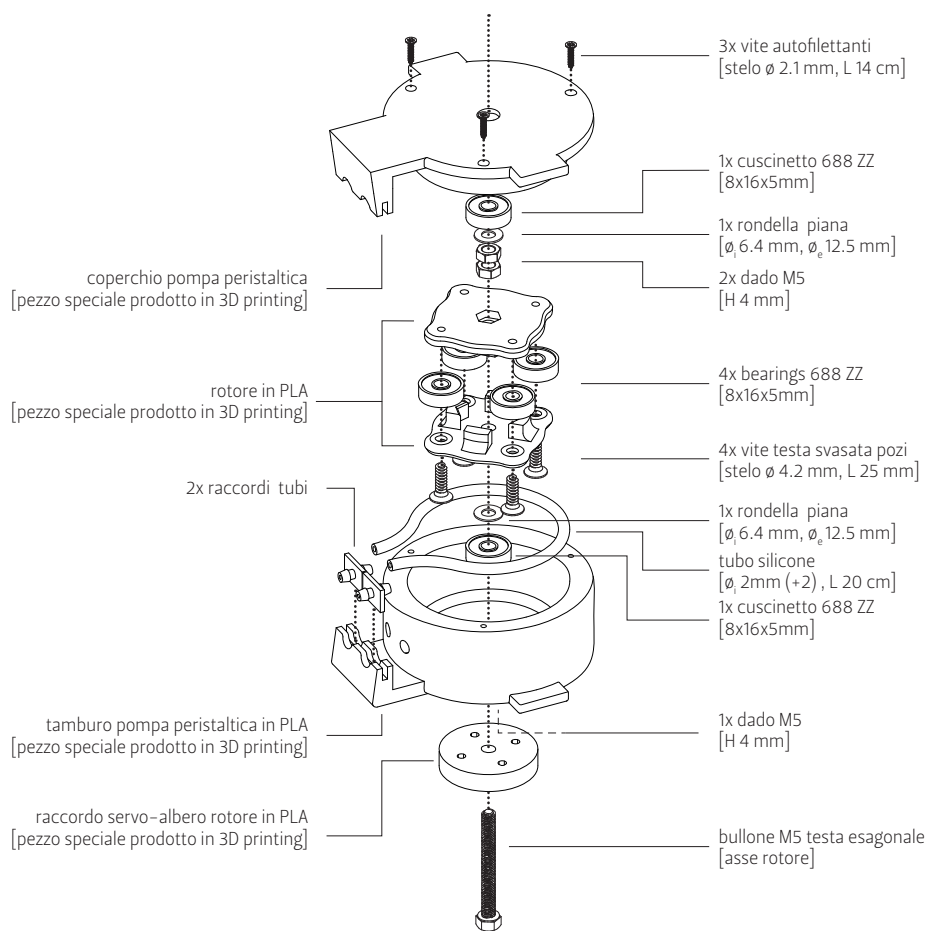
Dopo un confronto di idee avuto con Massimo Moretti di WASP (che ringrazio per i preziosi suggerimenti su alcuni aspetti costruttivi) si è deciso di realizzare una pompa peristaltica ⁴⁴ in grado di veicolare la soluzione di acetato contenuta nel serbatoio all'esterno senza significativi carichi energetici: un servo motore è stato collegato senza riduzioni al rotore della pompa (auto-costruita e stampata a partire da un modello digitale) Personalizzando il design di questo dispositivo è stato possibile adeguare le caratteristiche dimensionali e gli opportuni dettagli utili ad un'integrazione nell'architettura del prototipo robot ⁴⁵⁻⁴⁷.

La pompa peristaltica va progettata valutando attentamente la portata desiderabile e gli elementi che la realizzano. Sapendo di non poter contare su valori significativi di coppia e velocità del servo motore, non si è potuto perseguire l'obiettivo di una portata garantita. D'altra parte, considerata la dimensione contenuta del serbatoio, una portata elevata avrebbe per contro ridotto la durata di autonomia di estrusione del robot; la scelta obbligata di una deposizione per stillicidio è stata quindi considerata accettabile, trattandosi di un limite di risorsa disponibile per la prototipazione. La relazione tra le caratteristiche dimensionali dei cuscinetti (che realizzano i rulli necessari allo strozzamento del tubo) ed il loro numero sono aspetti ulteriori che incidono sulla portata. Nel progetto sviluppato sono stati inseriti 4 cuscinetti del tipo 688 ZZ, garantendo il minimo numero di pressioni da esercitare sul tubo in silicone passante all'interno dell'involucro. L'altezza del cuscinetto va riferita alla dimensione del tubo schiacciato, condizione necessaria affinché si abbia l'effetto di risucchio del liquido (peristalsi).

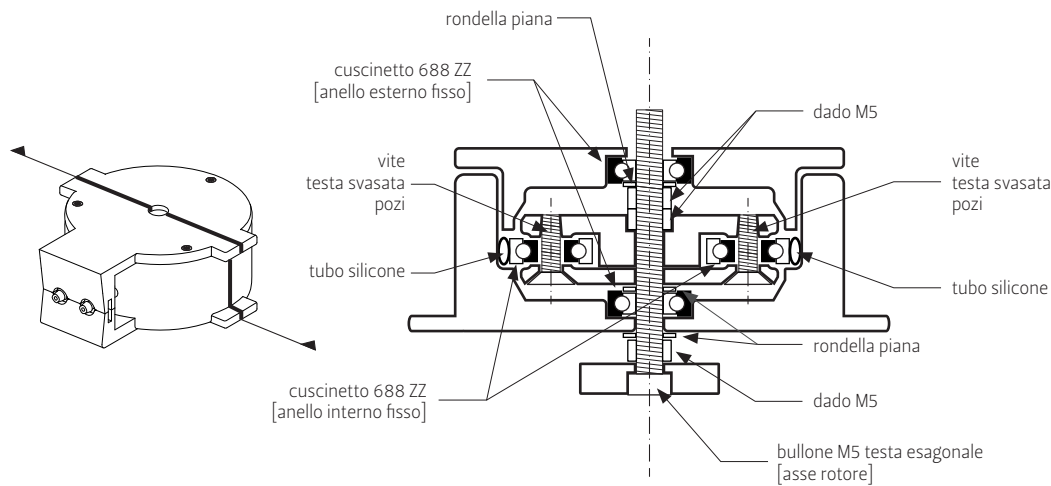
44 / La pompa peristaltica è un apparecchio che applica il principio della peristalsi, in base al quale la prevalenza al fluido trattato viene impressa da una strozzatura che scorre lungo il tubo. La pompa è costituita da un rotore a cui sono applicati due o più rulli che, ruotando, 'strozzano' il tubo e provocano l'avanzamento del fluido. Componente fondamentale della pompa è il tubo che deve resistere allo schiacciamento il più a lungo possibile, defromandosi, cioè in maniera elastica e non plastica. E' proprio l'elasticità che consente al tubo di riacquisire le dimensioni originali e quindi garantire la prevalenza al fluido e la capacità di aspirazione. La pompa peristaltica è per sua natura una pompa "pulsante", in quanto la portata non è costante sul singolo giro. Per ridurre il fenomeno della pulsazione si adotta, solitamente, un numero maggiore di rulli, con conseguente riduzione della portata.

45 / Una prima versione della pompa peristaltica realizzata.





46 / Esploso assonometrico



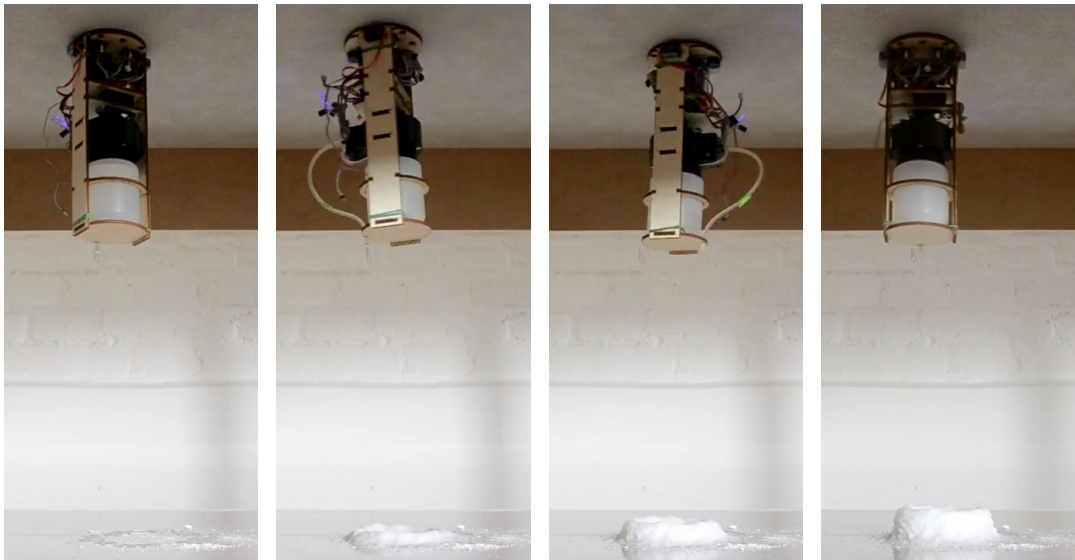
47 / Sezione trasversale

Messo a punto il dispositivo di estrusione costituito dall'insieme di pompa peristaltica e serbatoio collocato inferiormente al robot, si è proceduto a testare la capacità di formazione materiale di questa dotazione integrata nel prototipo. Alcune criticità di questa proposta tecnologia sono implicite nella natura instabile della soluzione supersaturata di acetato di sodio: in un processo estremamente dinamico come quello previsto, cambi di rotta improvvisi del robot o sollecitazioni meccaniche nel condotto della pompa peristaltica possono fare cristallizzare precocemente (e nel condotto stesso, otturandolo) l'acetato.

La prova, condotta con un solo agente robot in movimento lungo una traiettoria circolare, ha dimostrato una discreta sostenibilità della modalità costruttiva proposta^{48,49}, dunque non si sono

rilevati particolari inconvenienti durante il rilascio del materiale. La pompa ha lavorato continuamente durante tutto il processo pertanto il flusso di acetato all'interno del condotto è pulsante ma continuo per tutta la prova di costruzione. Questa, in particolare, è una condizione desiderabile dal momento che si manovra un materiale tendenzialmente reattivo: cicli di rilascio intermittente, controllati tramite programmazione del firmware, potrebbero aumentare la probabilità di fare cristallizzare l'acetato tra un ciclo di rilascio e quello successivo.

48 / Fotosequenza della costruzione secondo una traiettoria programmata circolare. L'intero serbatoio (250 ml) è svuotato in circa 14 minuti di estrusione in continuo.



49 / Viste di dettaglio della forma realizzata nel processo di estrusione e cristallizzazione dell'acetato.



Effettuata questa prima verifica dell'apparato estrusivo, che va ad integrarsi all'architettura senso-motoria fino a questo momento elaborata, si è e approfondita l'indagine per mezzo della simulazione, cercando di superare il vincolo contingente all'applicazione pratica permessa dalle poche unità di agenti robot disponibili.

In una prima fase, la simulazione ha considerato una popolazione costituita di un numero ridotto di agenti (una ventina, tanti quanti quelli che si sarebbero voluti realizzare, verificando così la corrispondenza tra i caratteri della costruzione simulata e quelli della costruzione fisica).

Con la simulazione si è valutato poi il lavoro prodotto da popolazioni più numerose di agenti: quaranta robot, cento robot, fino alle migliaia di individui che hanno fornito gli esiti più interessanti.

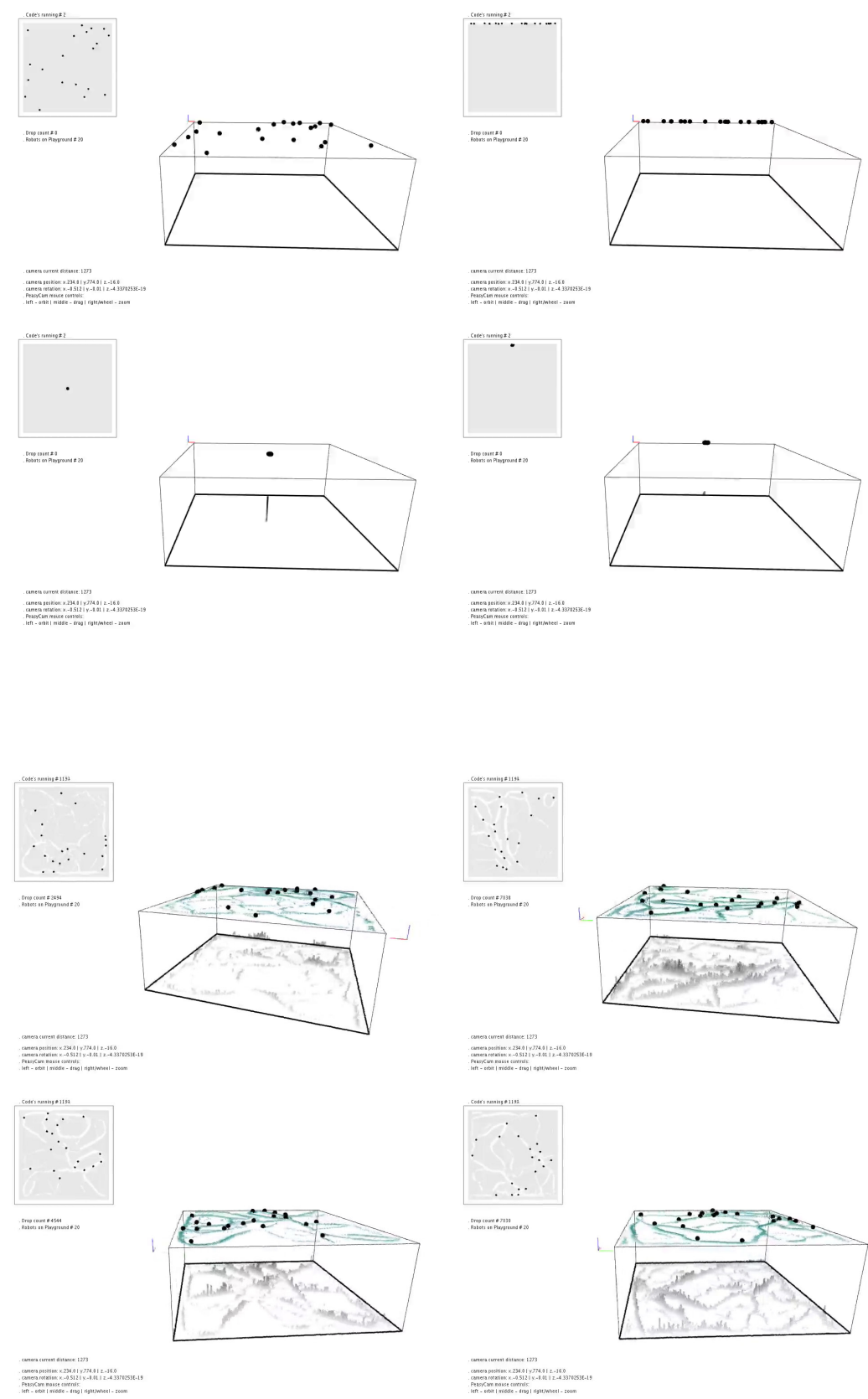
Si sono simulati gli effetti derivanti da condizioni di avvio contemporaneo del processo costruttivo, così come di inserimento progressivo degli agenti sulla piattaforma di costruzione. Gli agenti sono stati posizionati da principio nello spazio in modo eterogeneo ma anche secondo configurazioni ordinate, valutando sempre i prodotti delle interazioni a scala globale.

La simulazione ha presto cominciato ad essere strumento di esplorazione svincolata da giustificazioni necessariamente logiche o razionali: tale atteggiamento ha permesso di prendere confidenza con il potenziale espressivo del sistema multi-agente che, considerato il suo carattere non-lineare, manifesta forme di evoluzione divergente anche significative al variare delle condizioni iniziali.

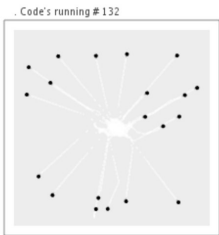
Si sono sperimentate diverse modalità con cui visualizzare la forma cresciuta per deposito di materiale da parte dei robot simulati.

Nubi di punti, o mesh rappresentano alternativamente il prodotto della costruzione operata dagli agenti. Si sono sviluppate *funzioni di equalizzazione* laddove una rappresentazione puramente numerica dei dati perde di vista il comportamento fisico che porta nella realtà il materiale a redistribuirsi in aree (di minimo potenziale) prossime a quelle di primo contatto.

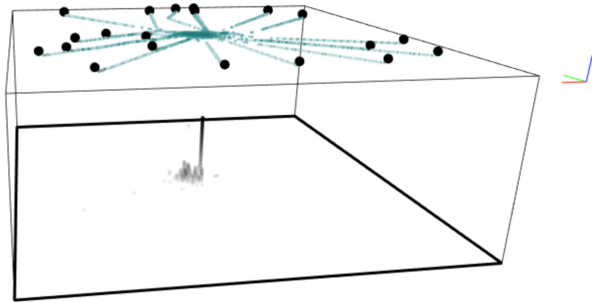
Nelle pagine seguenti è proposta una selezione di immagini a sintesi delle molteplici esplorazioni che, opportunamente selezionate, hanno permesso l'affinamento di un processo simulato e coerente con gli aspetti inerenti la costruibilità di prototipi funzionali.



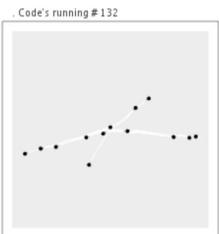
50 / Ogni quadrante della due schermate illustra l'evoluzione del sistema per diverse configurazione di avvio del sistema. Tutti i robot cominciano a muoversi nello stesso istante. Il quadrante in alto a sinistra, e procedendo in senso orario, mostra i robot disposti in modo sparpagliato sul playground, su un suo lato, al centro di un suo lato, al centro del playground. Nella schermata in basso, è possibile osservare la crescita della deposizione dopo alcuni iterazioni di sistema, percepibili nei profili di creste grige. Sono punti che si impilano dal basso verso l'alto a riempire una ideale griglia spaziale.



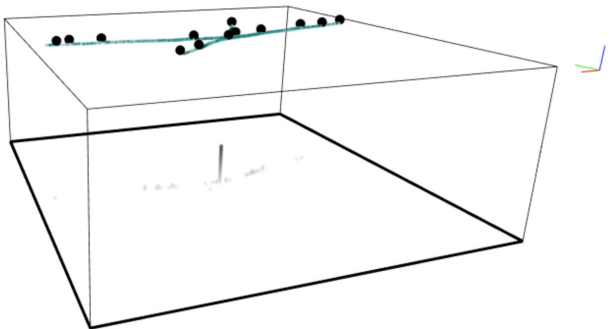
. Drop count # 211
. Robots on Playground # 20



. camera current distance: 1273
. camera position: x: 234.0 | y: 774.0 | z: -16.0
. camera rotation: x: -0.512 | y: -0.01 | z: -4.3370253E-19
. PeasyCam mouse controls:
. left - orbit | middle - drag | right/wheel - zoom



. Drop count # 39
. Robots on Playground # 13

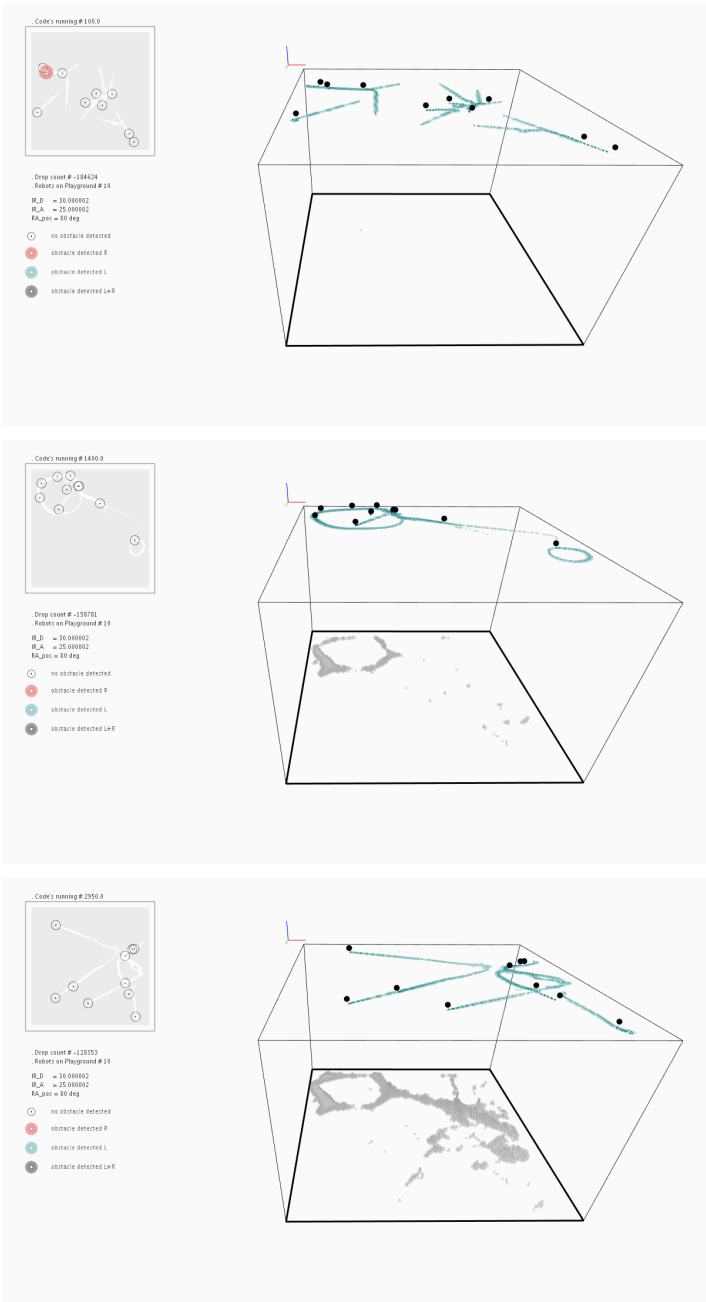


. camera current distance: 1273
. camera position: x: 234.0 | y: 774.0 | z: -16.0
. camera rotation: x: -0.512 | y: -0.01 | z: -4.3370253E-19
. PeasyCam mouse controls:
. left - orbit | middle - drag | right/wheel - zoom

51 / La medesima configurazione che vede tutti i robot inseriti sul playground in posizione centrale. In alto, tutti i robot sono posizionati allo stesso istante. In basso, i robot vengono inseriti ad un numero di iterazioni l'uno dall'altro, progressivamente.

Come già accennato, la mappa che riporta la distribuzione di densità del materiale depositato è un livello informativo non dissimile dal *layer traccia*. Si è quindi valutata l'ipotesi di dotare le unità robot della capacità di leggere ed interrogare localmente (tramite sensore a ultrasuoni ⁵²) questo specifico dato ambientale. L'obiettivo implicito in questa operazione è il contenimento di un processo che ha finora esibito forme di costruzione distribuita uniformemente su tutto il piano di deposizione: al contrario, si vuole stimolare un fenomeno di accrescimento circoscritto che strutturi la materia verticalmente. Nonostante l'estrema semplicità che connota la capacità cognitiva di ciascun agente robot ma perseguendo l'obiettivo descritto, è stata proposta una doppia modalità comportamentale (tipo A e B) che i robot esprimono processando la totalità delle informazioni ambientali che rilevano tramite l'apparato sensoriale di cui dispongono ^{53,54}.

52 / In chiusura al presente paragrafo si riportano le ragioni per le quali i sensori a ultrasuoni si sono rivelati inefficaci rispetto l'obiettivo discusso.



53 / Comportamento di tipo A
[10 robot sul playground]
[0 ≤ frameCount < 3000]

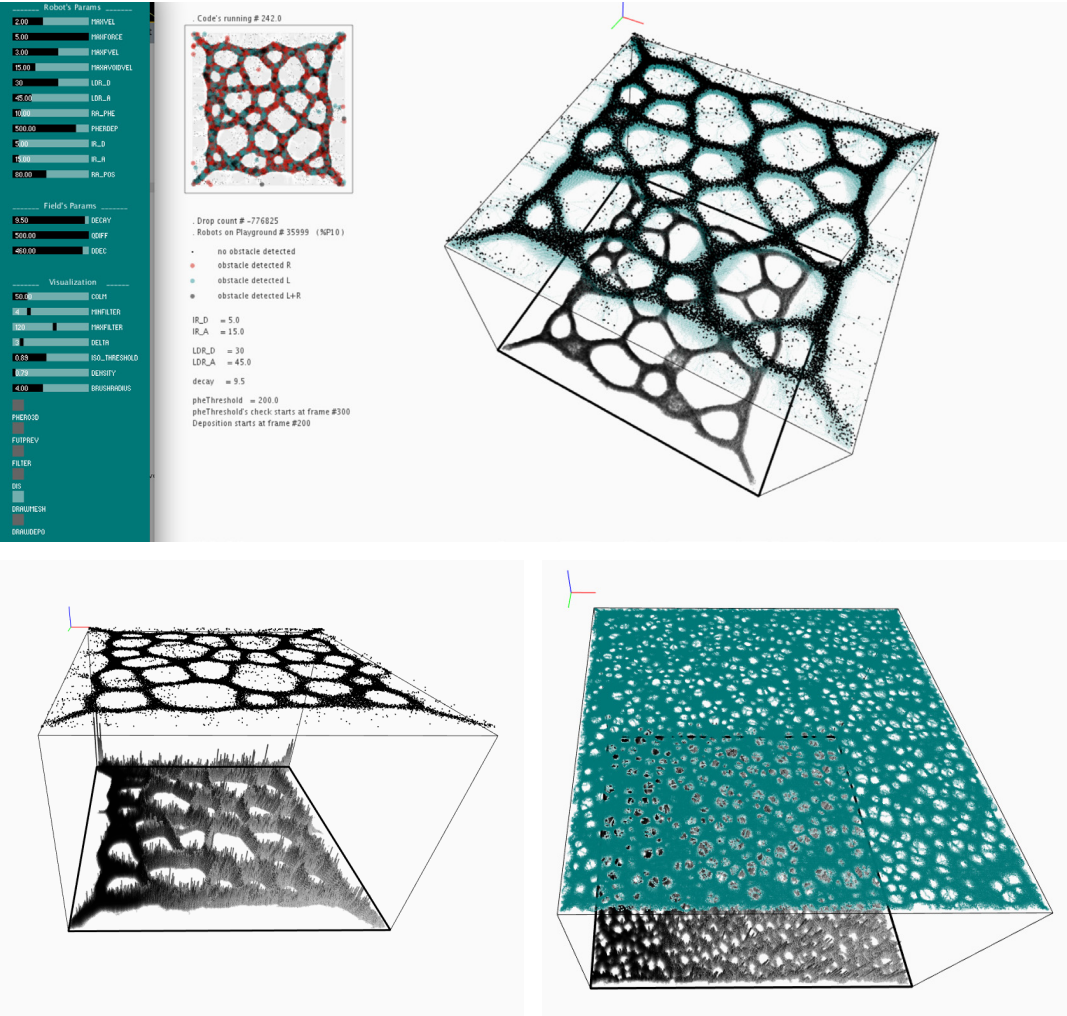
Le tracce di chemioattrattore sono rilasciate in continuo dai robot. Il pattern stigmergico è percepibile come traccia luminosa che svanisce gradualmente ma anche come accumulo di materiale depositato sul terreno.

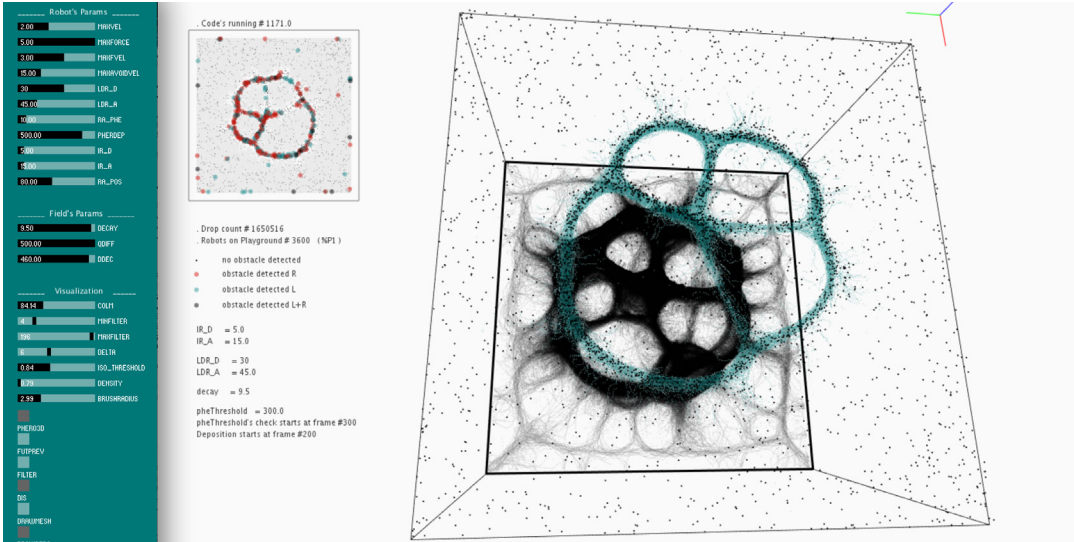
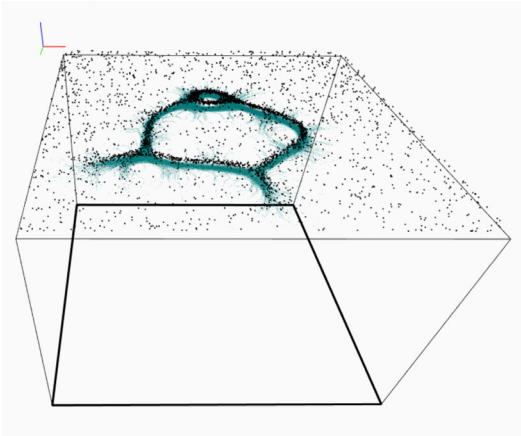
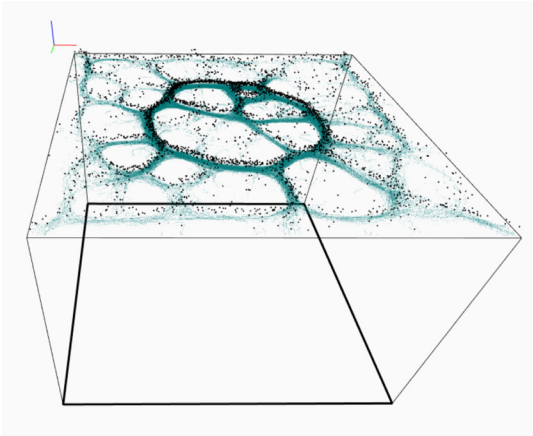
Riprendendo in mano la lettura del paper di Jones, si sono operati alcune modifiche circa alcune caratteristiche del modello chemiotattico codificato che stavano cedendo il passo a comportamenti prevalentemente stigmergici di tipo classico. Si è proceduto in particolare ad un salto di scala nella dimensione della popolazione di agenti.

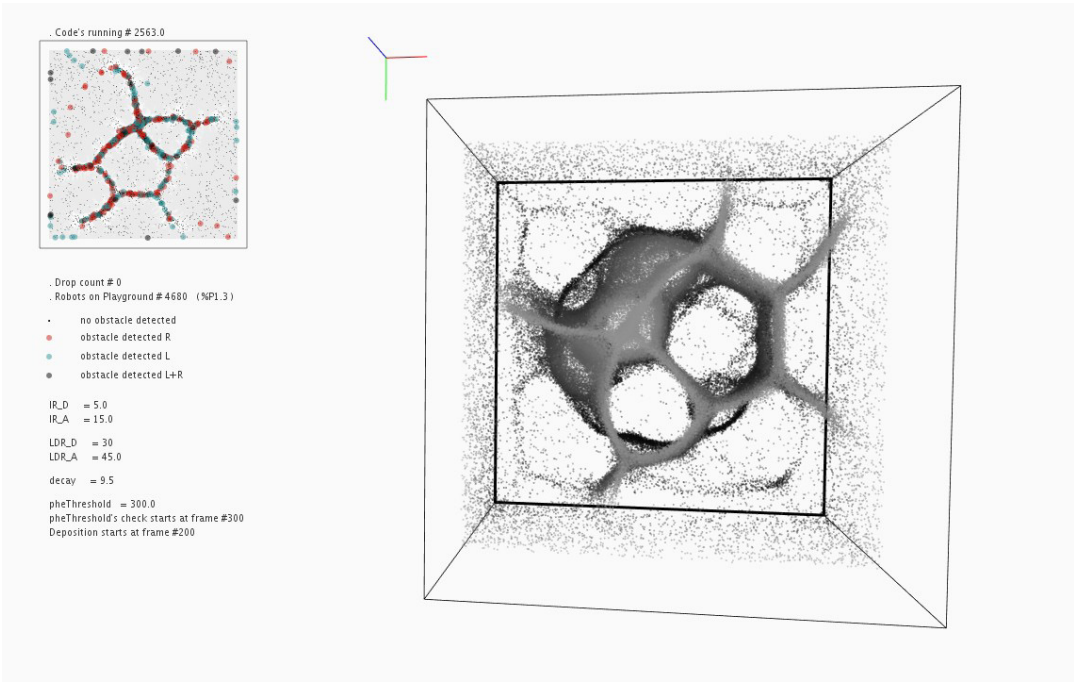
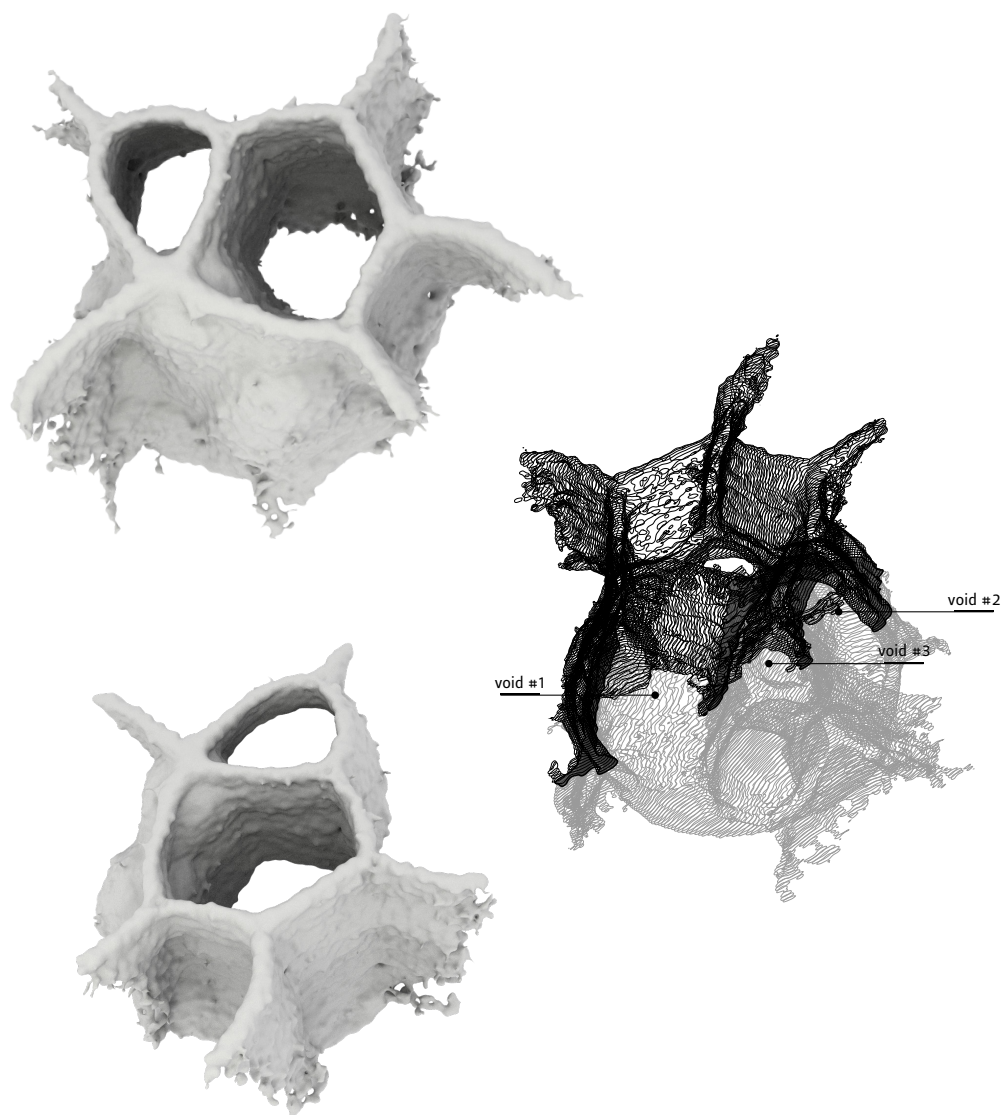
Nelle immagini che seguono, il numero di agenti coinvolti nelle simulazioni oscillano tra le 1800 e le 36000 unità⁵⁴. Con questi numeri si perviene a formazioni emergenti di sciame (che, ora, può definirsi tale a pieno titolo), avanzando prime ipotesi interessanti in termini spaziali–architettionici^{56,57}.

55 / Aumentando il numero di agenti che interagiscono sul playground e ridefinendo gli intervalli di variabilità di alcuni parametri, la formazione materiale emergente tende ad occupare in modo strutturato la superficie di deposizione. Le reti che si formano risultano più o meno dense in funzione del parametro che determina per ciascun agente la profondità di visuale con cui rileva traccia feromonica.

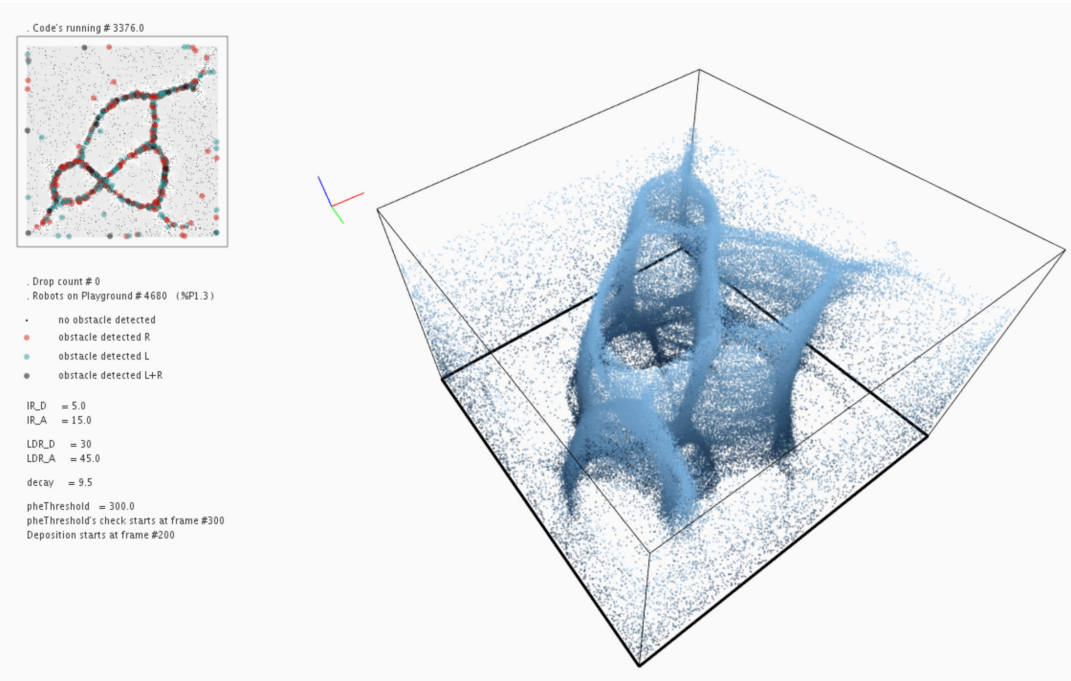
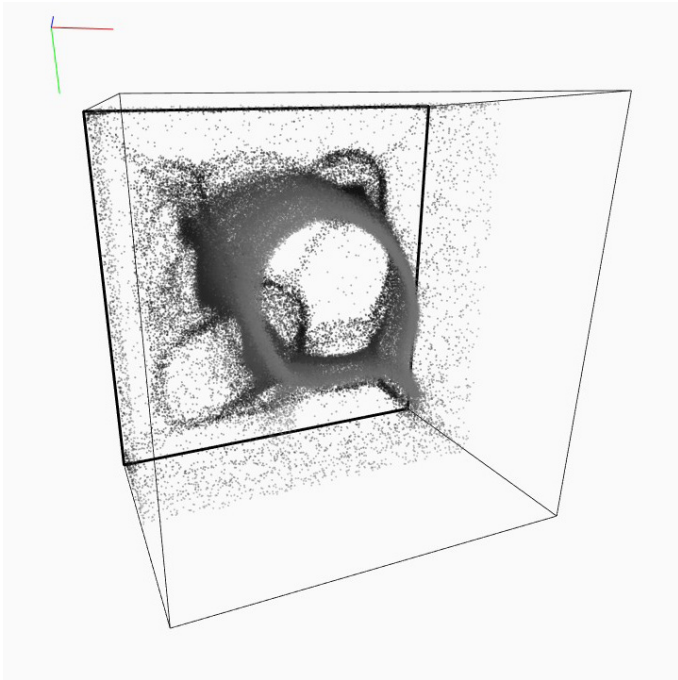
56 / Pagina accanto. Anche con questa rinnovata impostazione, si valutano gli effetti di macro–configurazioni (circolari) nel posizionamento degli agenti all'avvio della simulazione.





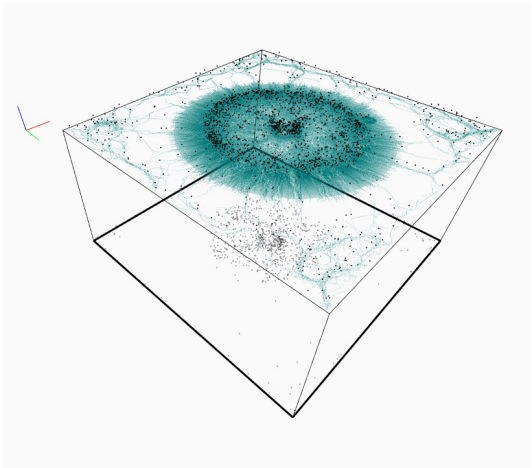
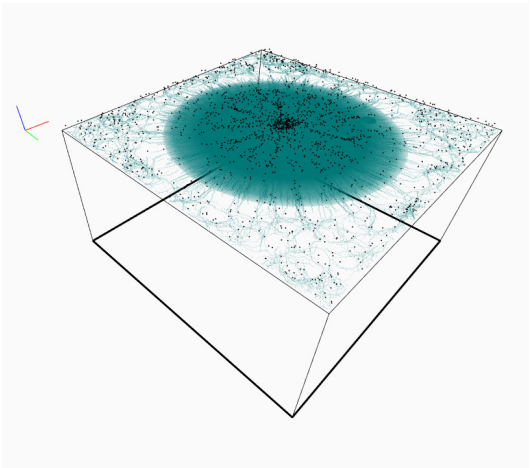


57 / La formazioni materiali cominciano a manifestare un proprio carattere spaziale fatto di cellule che si fondono o si producono nella crescita per deposizione operata dagli agenti robot. Nella pagina accanto, tramite algoritmo *marching cubes* viene attribuita una massa alla nube di punti. Una serie di sezioni rivela l'articolazione cellulare degli spazi interni.



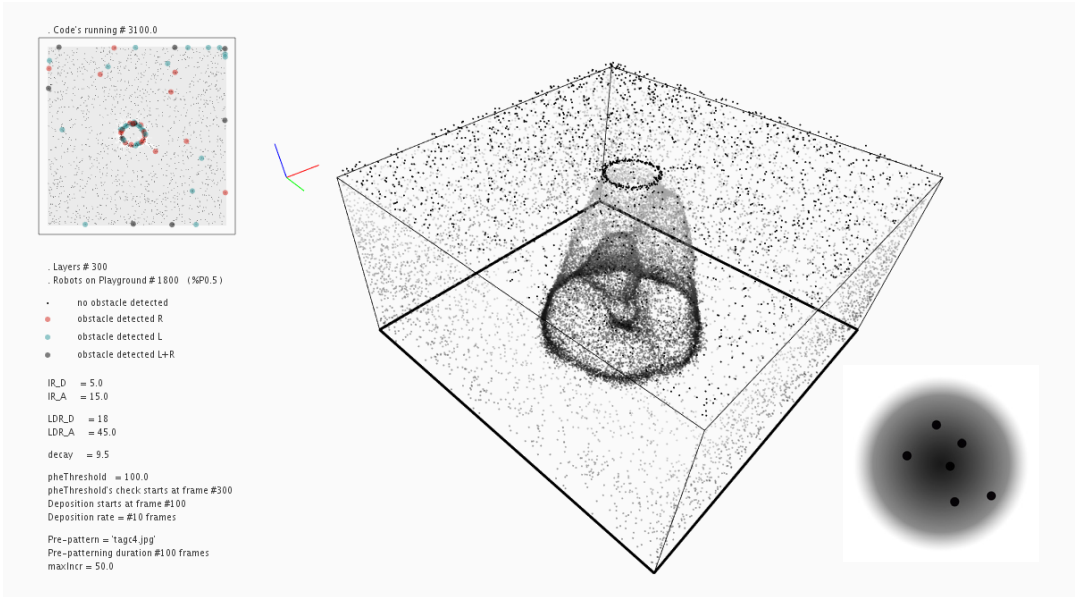
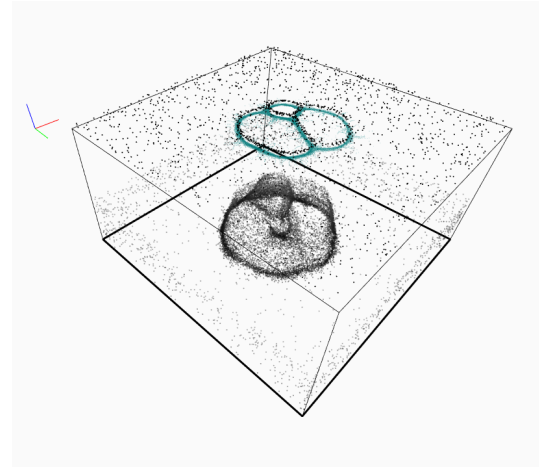
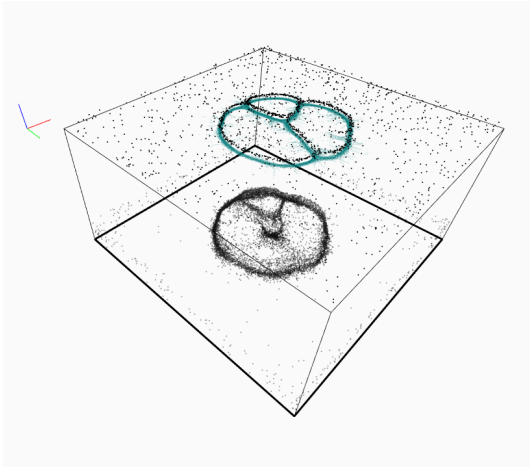
L'utilizzo di forme 'morbide' di controllo permesse dal *pre-patterning* (descritto in apertura del presente capitolo) si è rivelato utile ad un instradamento della formazione materiale associata al fenomeno emergente stigmergico⁵⁸. Con questa modalità operativa, va sviluppata una sensibilità da parte del designer-programmatore circa le possibili tendenze del sistema in risposta ai diversi pattern di stimolo: il *pre-patterning* si configura infatti come una sequenza di gradienti di intensità che alterano il *layer traccia*, definendo stati attrattivi temporanei nel sistema.

La risposta non-lineare del sistema presuppone un'indagine metodica in vista di una classificazione di famiglie a cui ricondurre i risultati ottenibili. Sarebbe dunque auspicabile, per un approfondimento del presente lavoro, la tracciatura

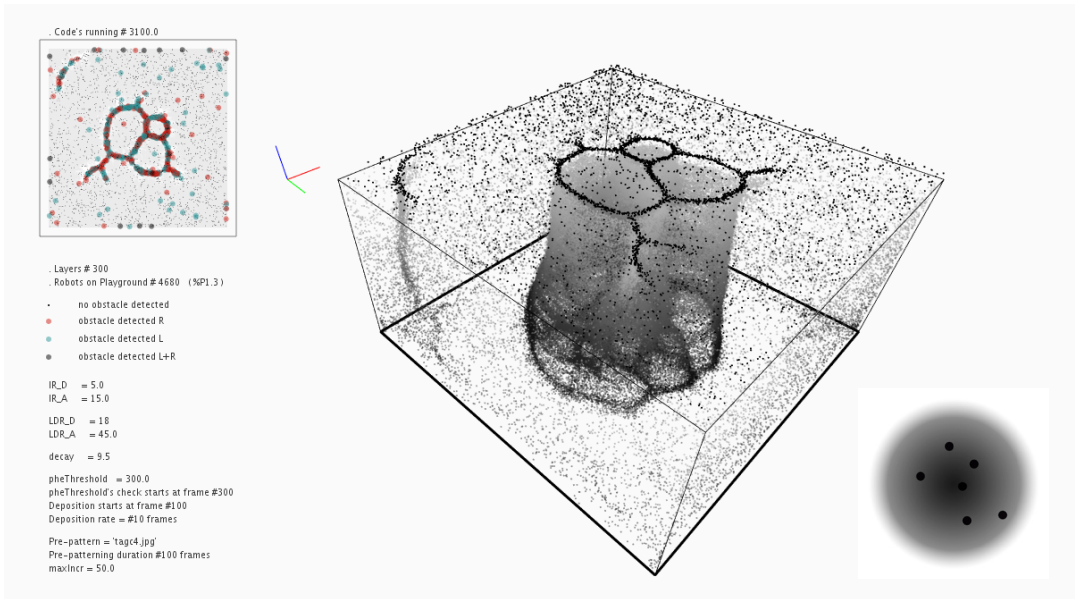
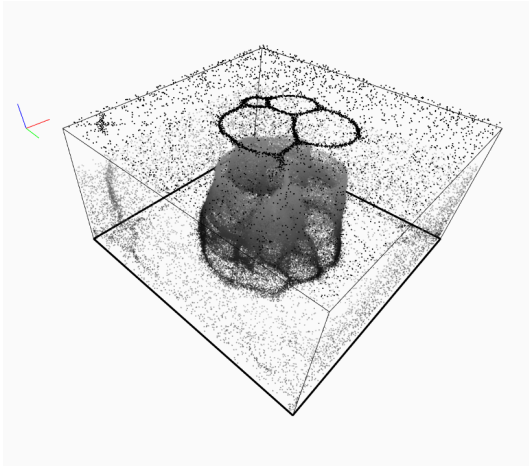
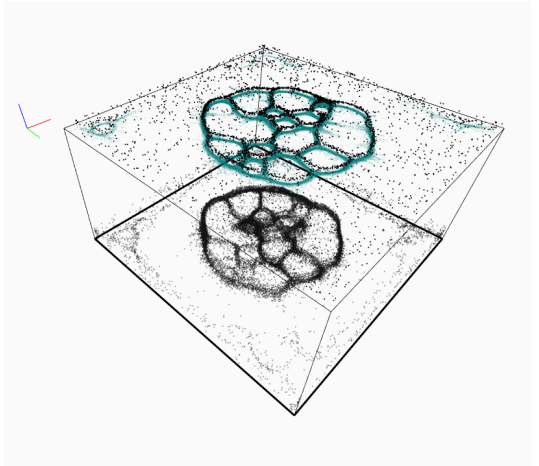
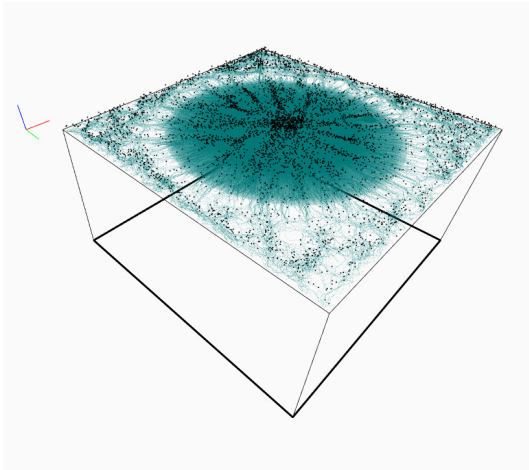


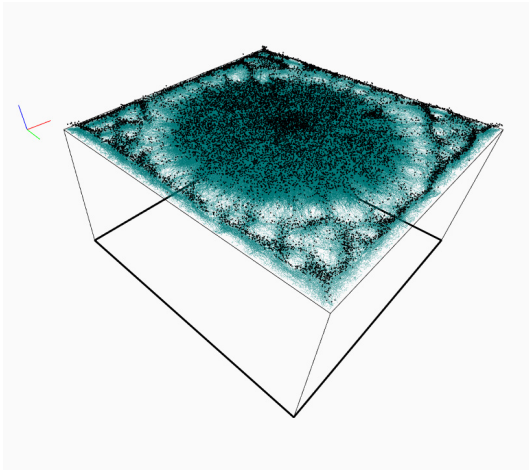
di tassonomie di crescita mediate dai *pre-pattern*, così da strumentalizzare il sistema stigmergico in vista della sua capacità costruttiva, senza rinunciare alla coerenza interna al sistema, intervenendo progettualmente con forme di controllo indiretto. Si riportano di seguito alcuni risultati ottenuti che forniscono una base di partenza per ulteriori indagini.

58 / Una sequenza di accrescimento guidata da *pre-patterning*. La densità della popolazione gioca di nuovo un ruolo fondamentale. In questa e nelle prossime due simulazioni riportate nelle pagine seguenti, il set-up dei parametri, *pre-pattern* compreso, rimane il medesimo: si varia invece il numero di individui costituente lo sciame robot. In questa simulazione, gli agenti sono 1800.

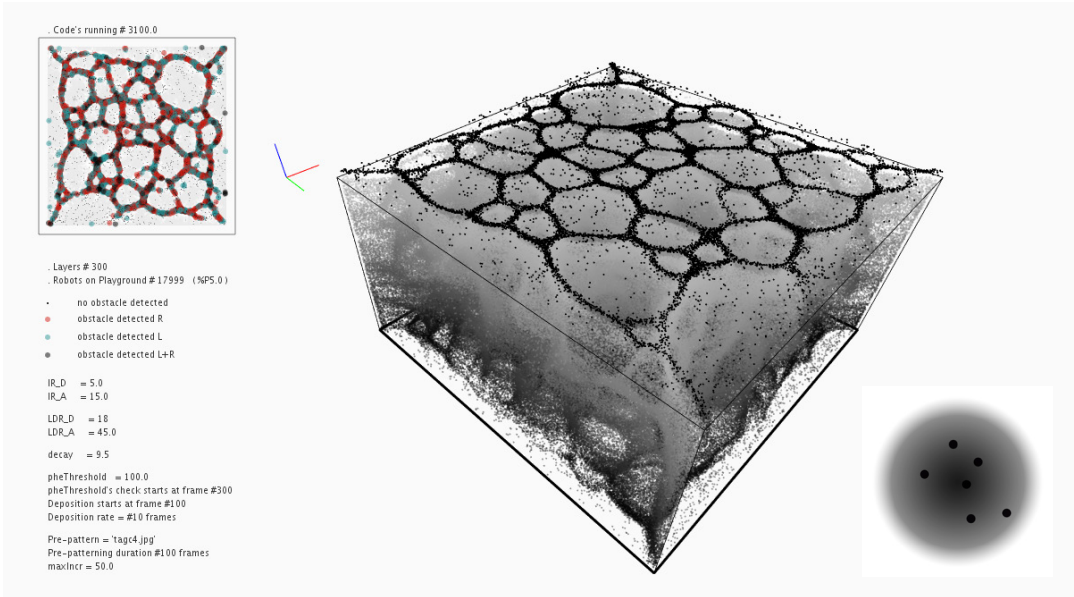
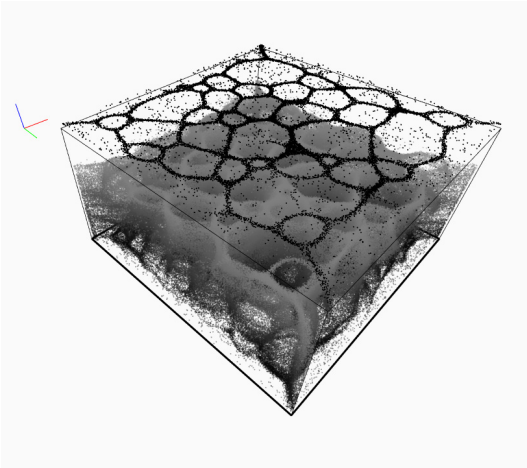
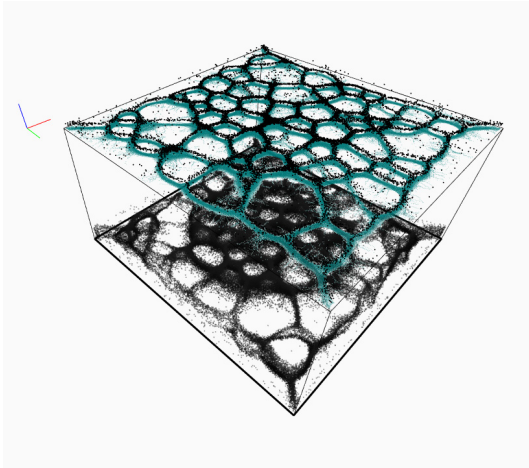


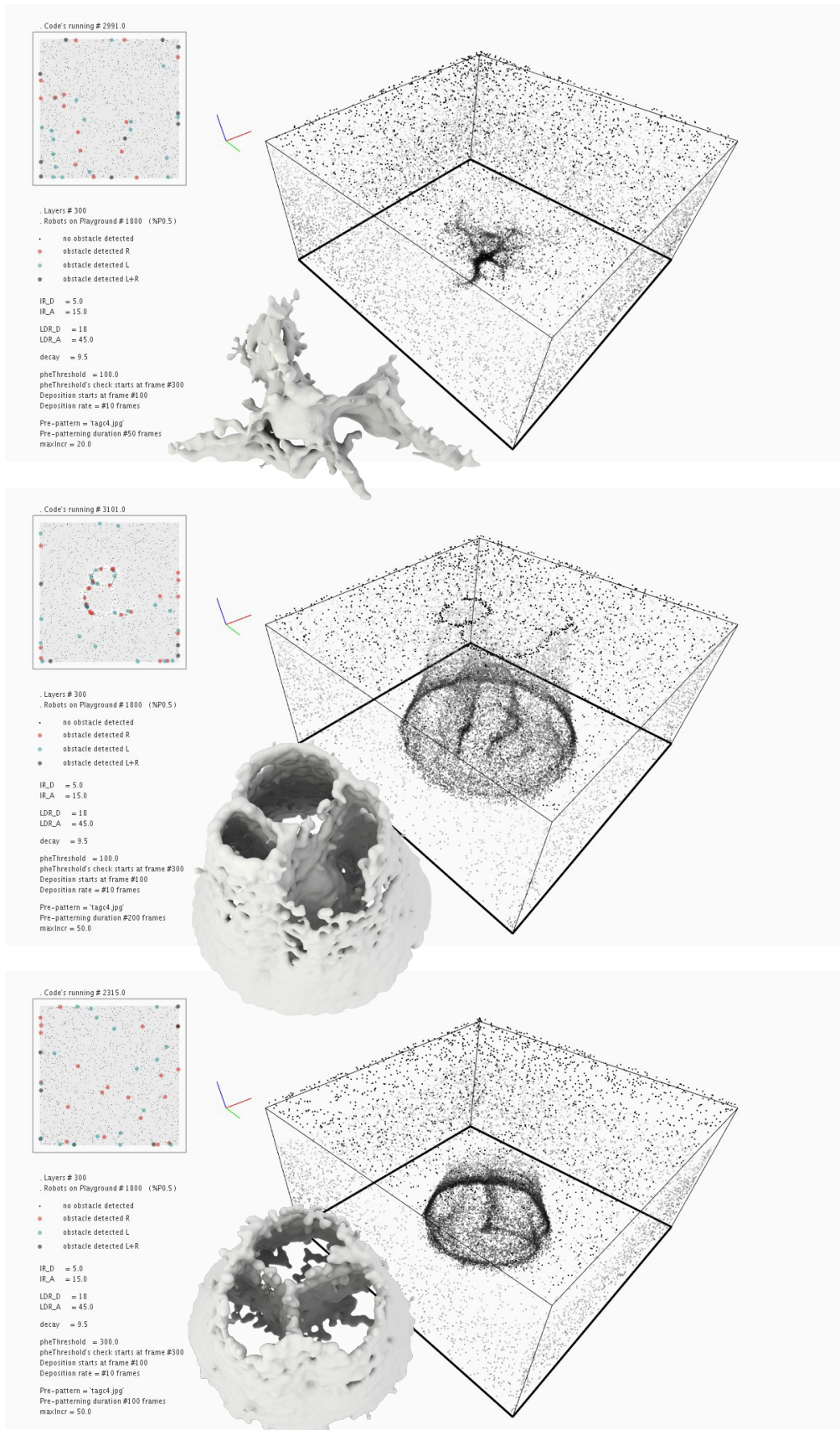
59 / Popolazione costituita da 4680 unità robot interagenti.
Il pre-pattern, visibile nell'ultima sequenza in basso a destra, altera il layer traccia durante le prime 100 iterazioni di sistema.



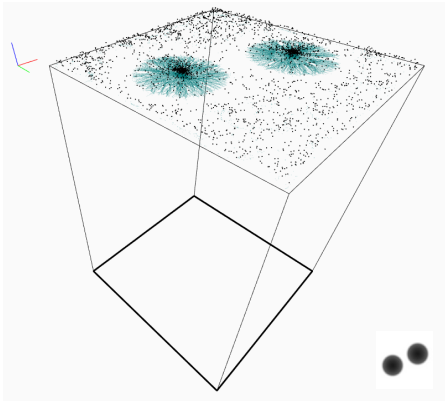


60 / Popolazione costituita da 18000 unità robot interagenti.

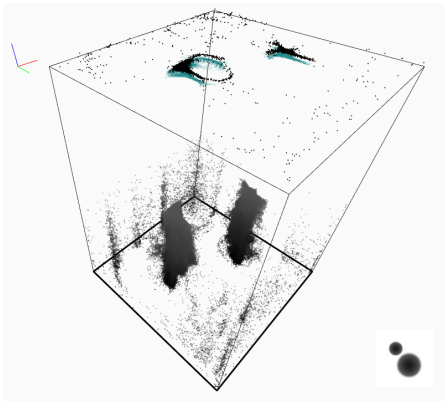




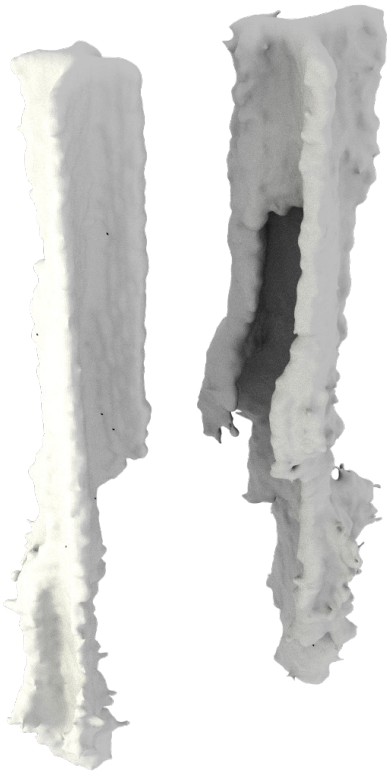
61 / Alcune variazioni ricavate variando i parametri che definiscono l'intensità (*maxIncr*) e la durata del pre-pattern. La popolazione di agenti è costituita di 1800 unità.



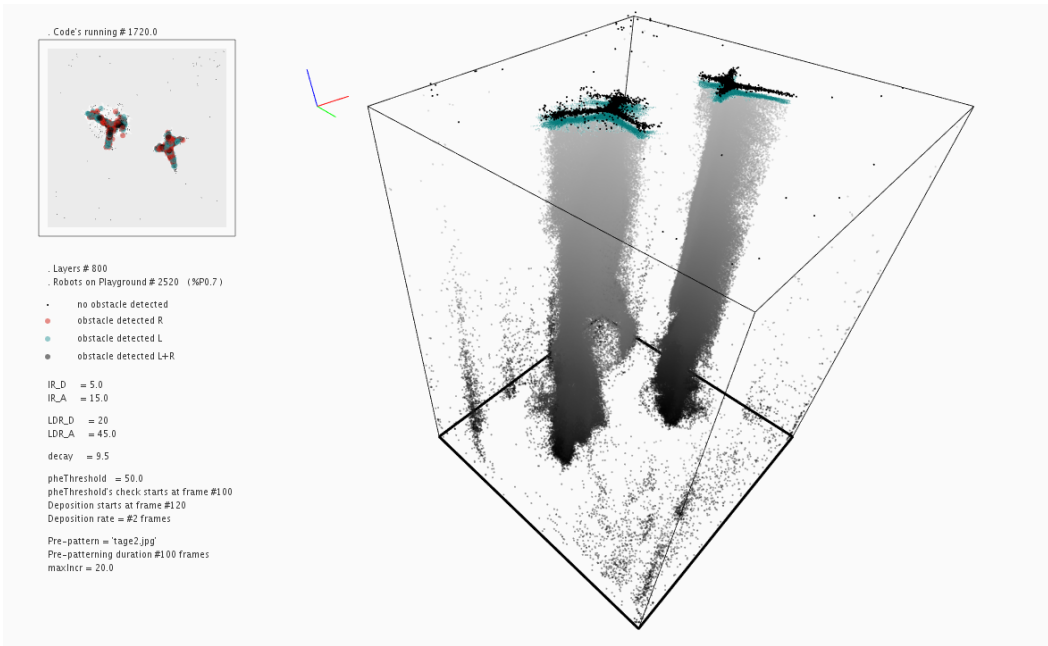
tage3.jpg

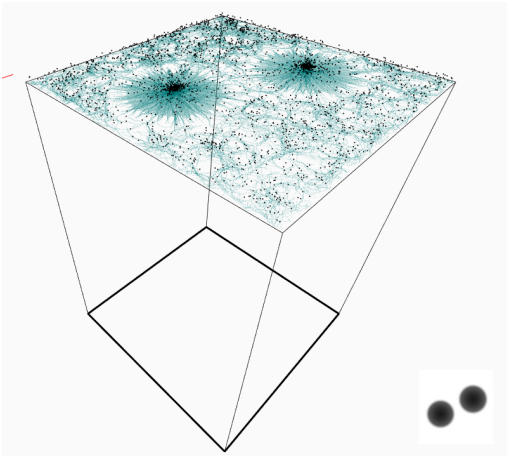


tage8.jpg

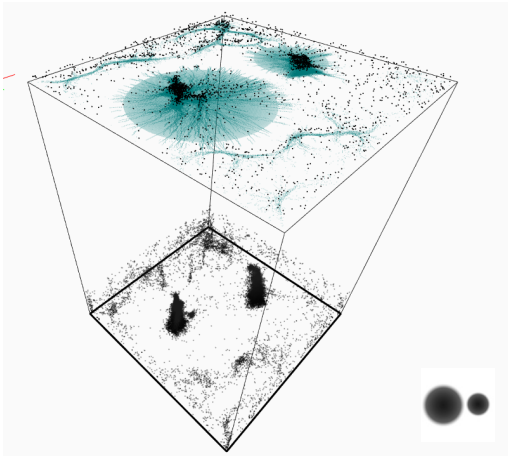


62 / Sono qui applicate sequenze di pre-pattern, scanditi nel tempo con durate variabili. I toni di grigio del pattern può rimapparsi tra $-maxIncr$ e $+maxIncr$. In questo modo il pre-pattern opera intensificando o riducendo la traccia di chemioattrattore.

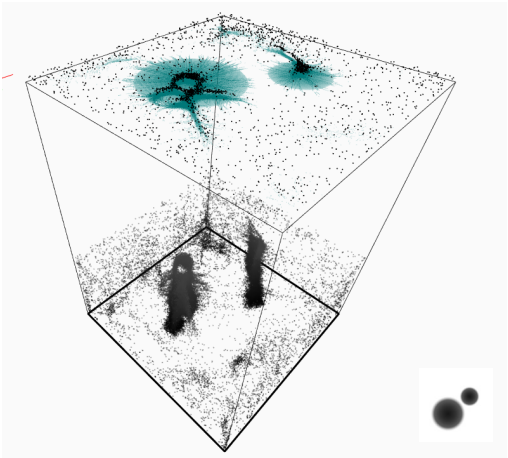




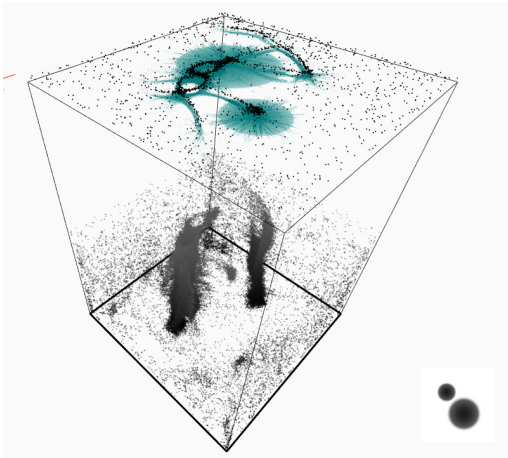
tage3.jpg



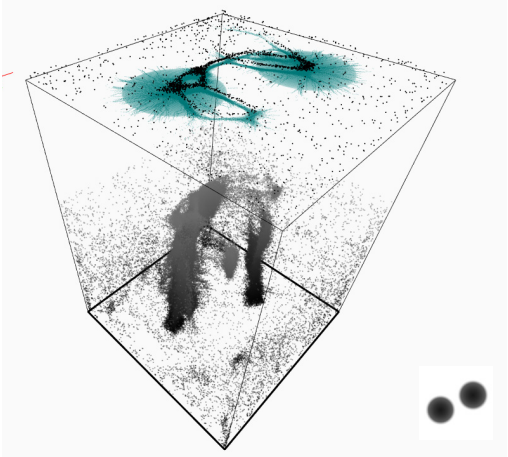
tage5.jpg



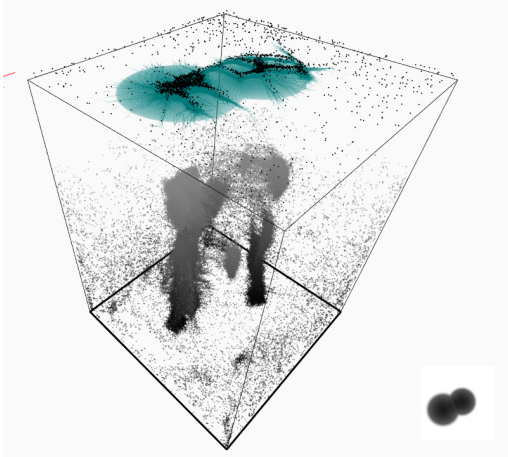
tage7.jpg



tage8.jpg



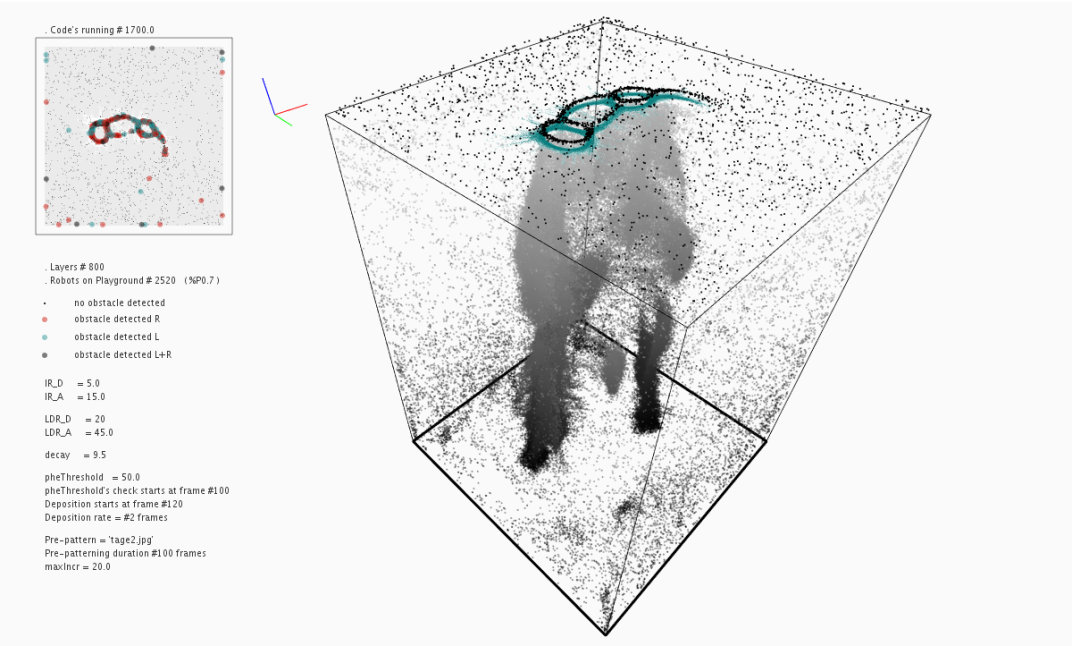
tage3.jpg

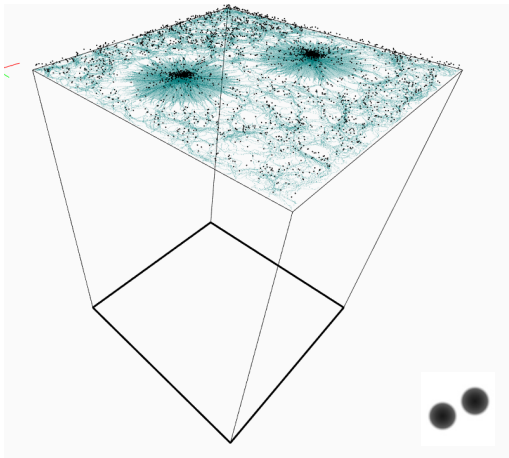


tage2.jpg

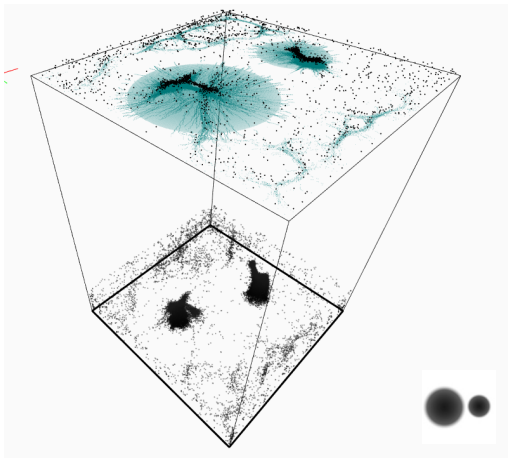


63 / Sequenze di formazione guidata da *pre-patterning*.
I toni di grigio del pattern sono rimappati tra 0 e +maxIncr.

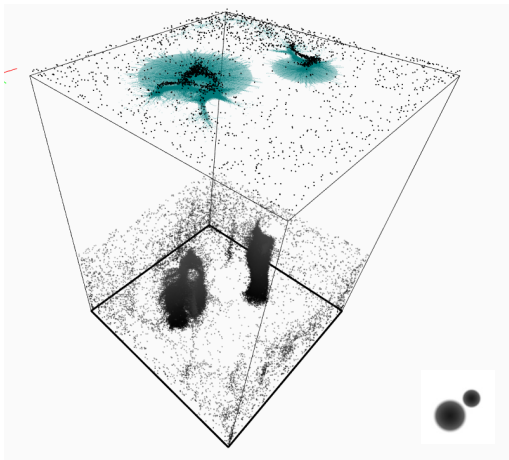




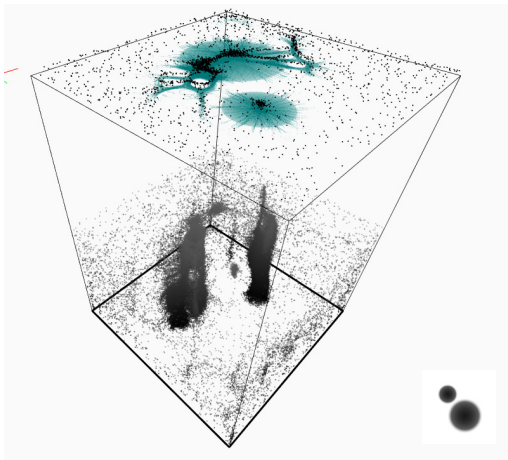
tage3.jpg



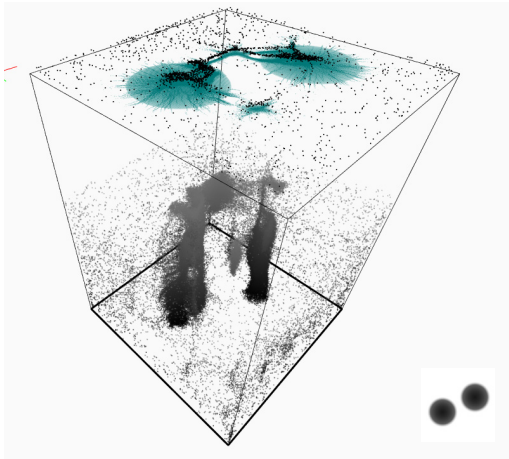
tage5.jpg



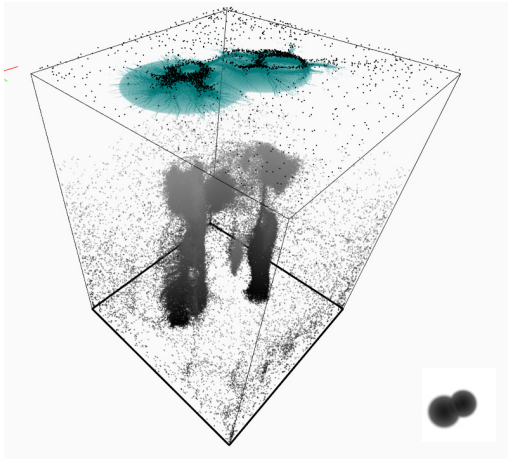
tage7.jpg



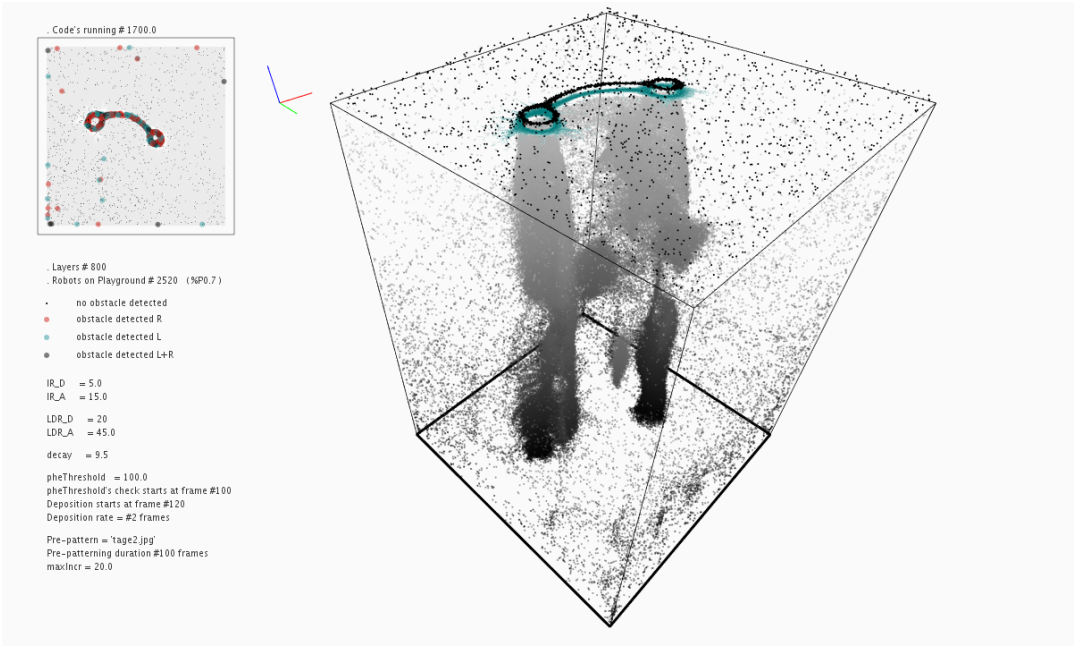
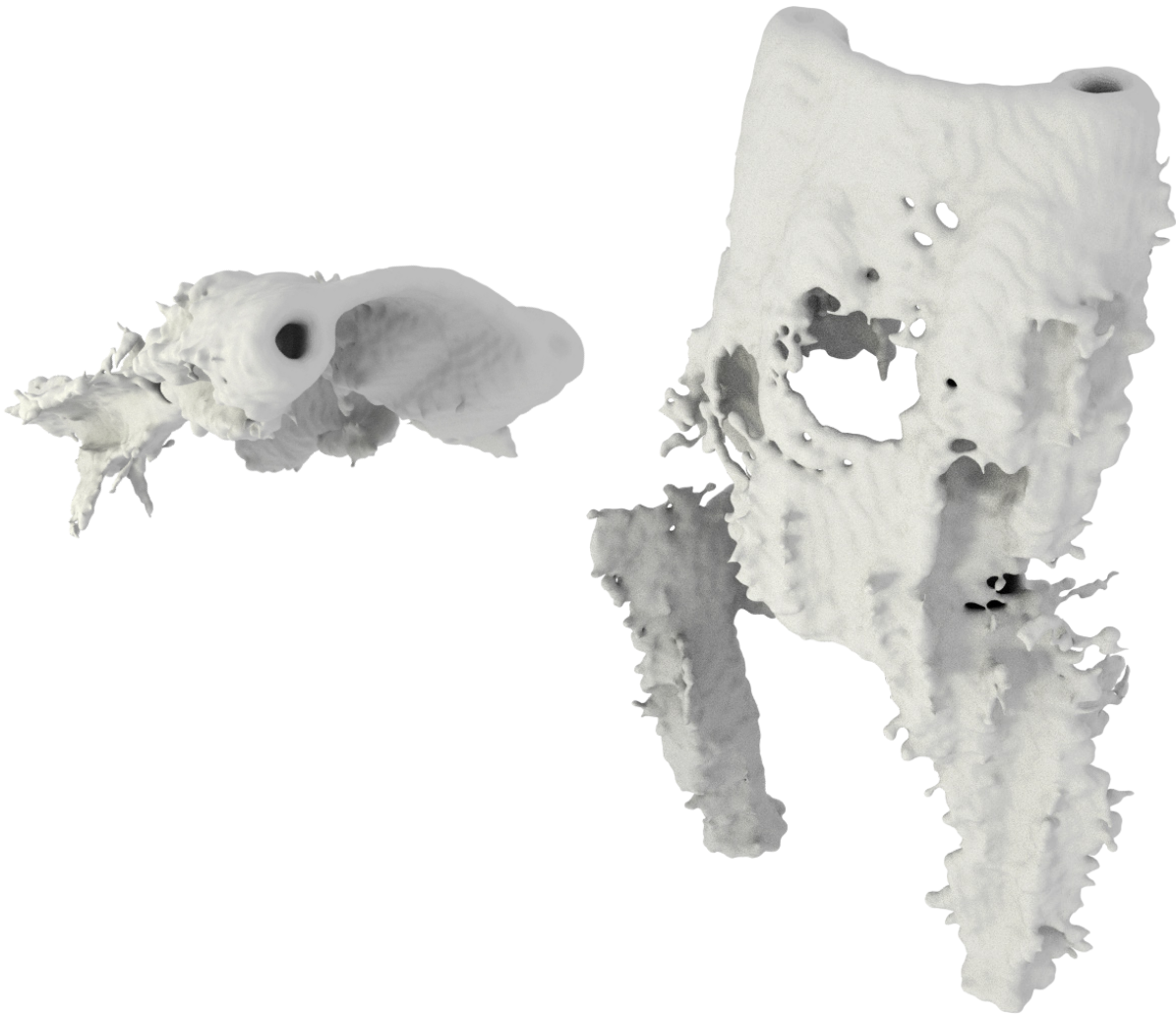
tage8.jpg

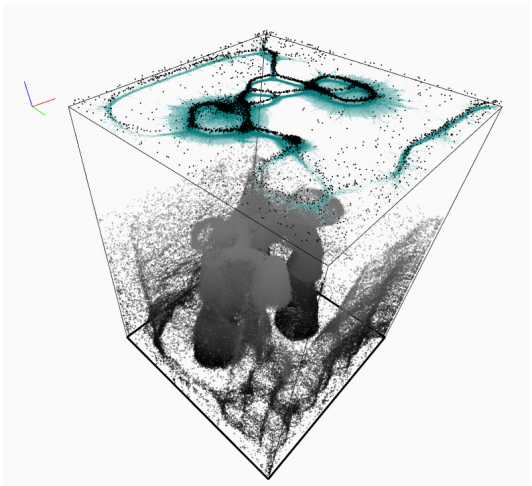
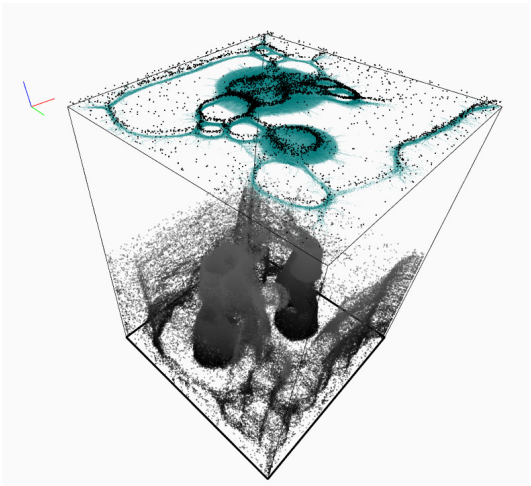
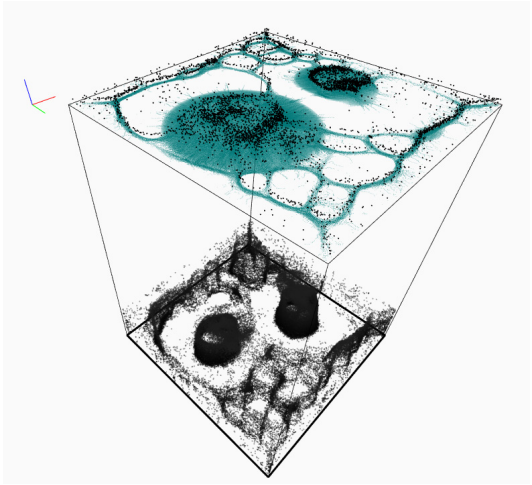
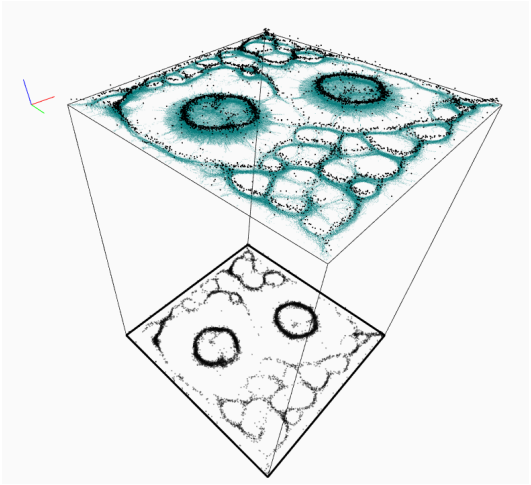


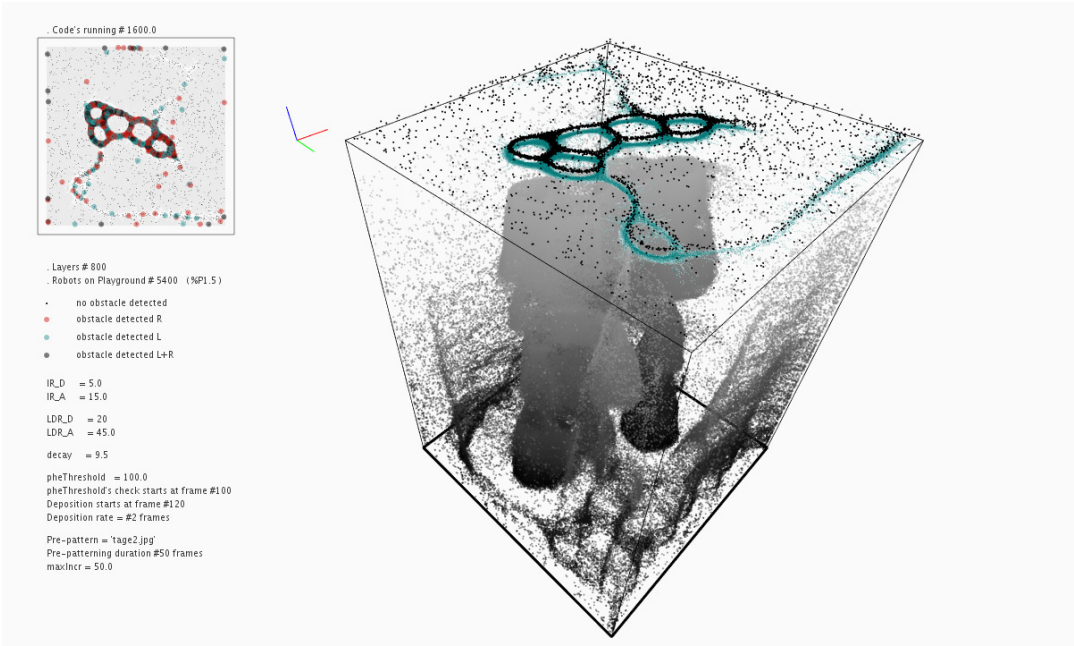
tage3.jpg

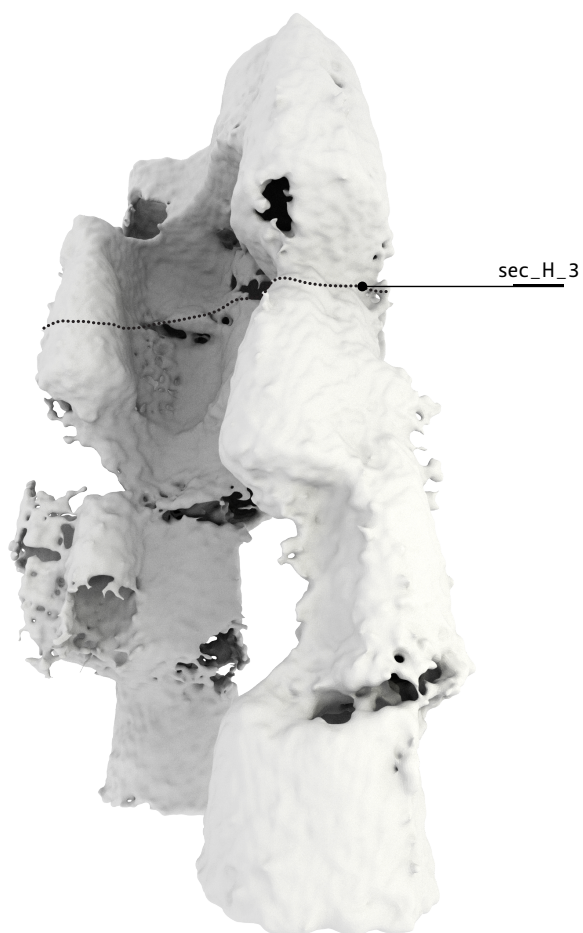


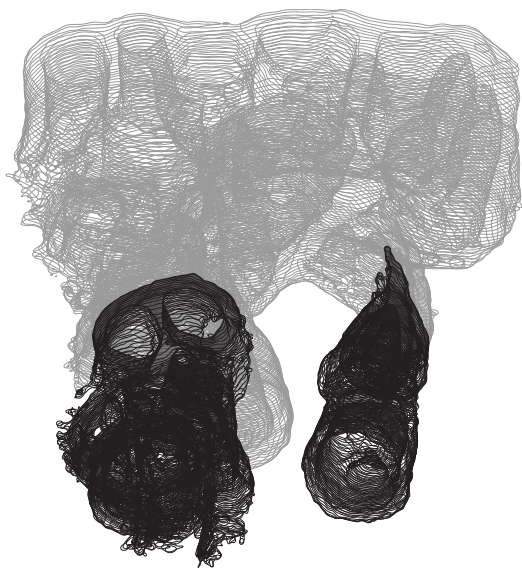
tage2.jpg



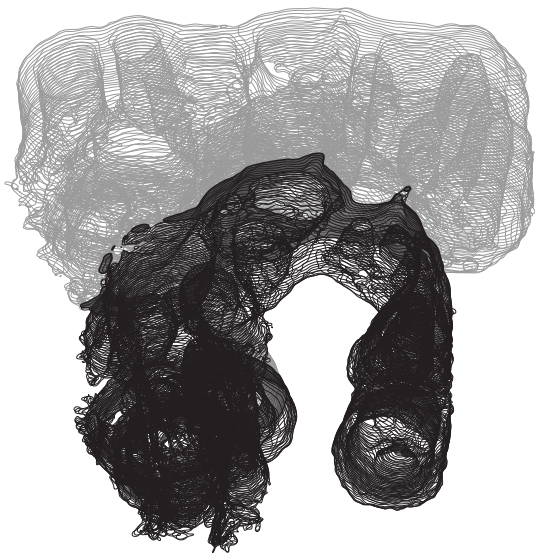
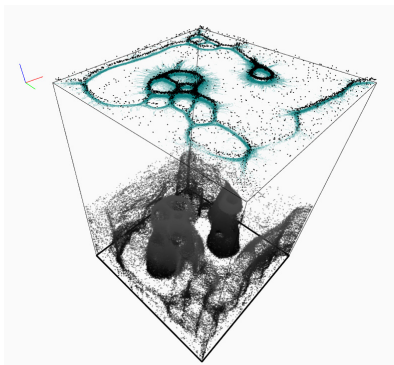




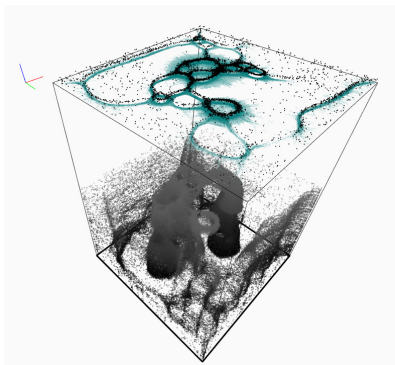




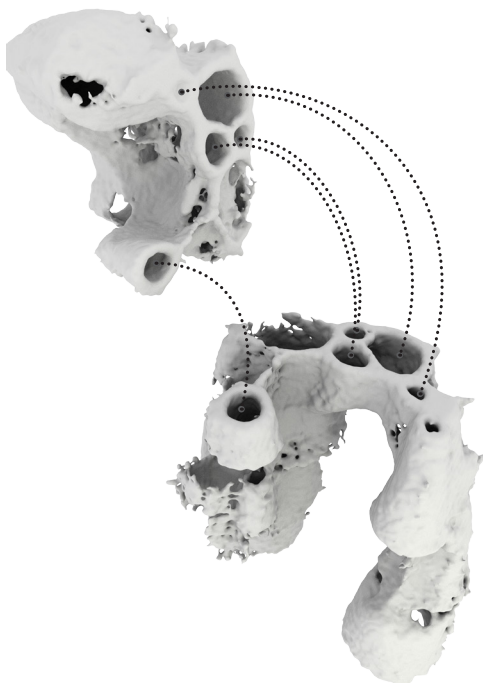
sec_H_1

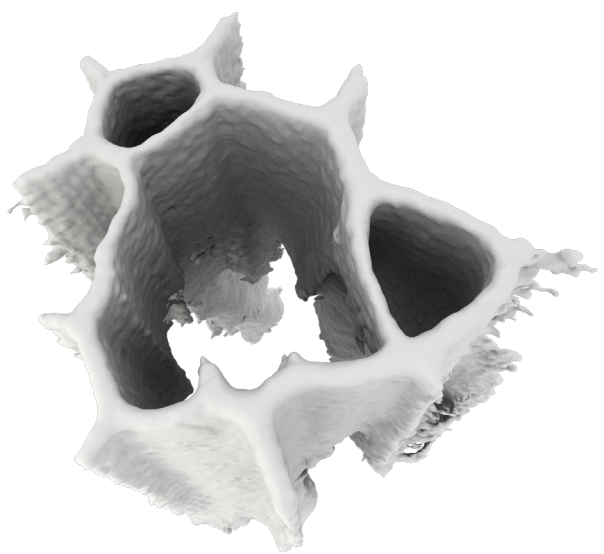
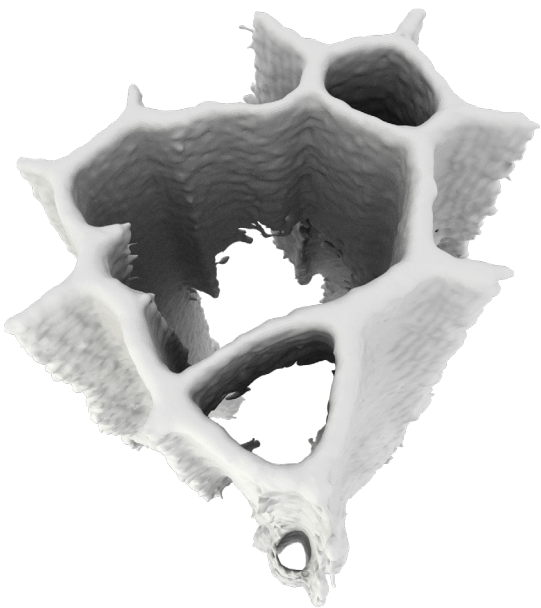
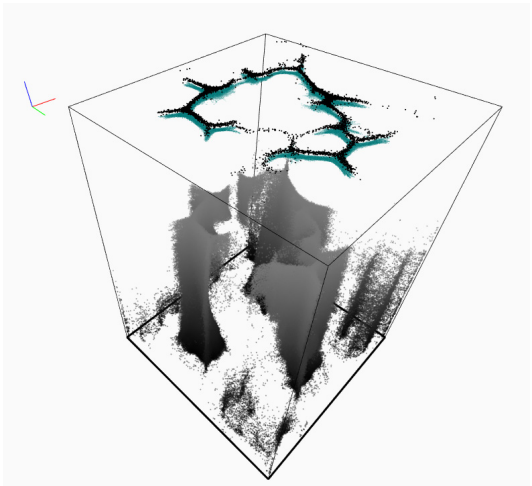
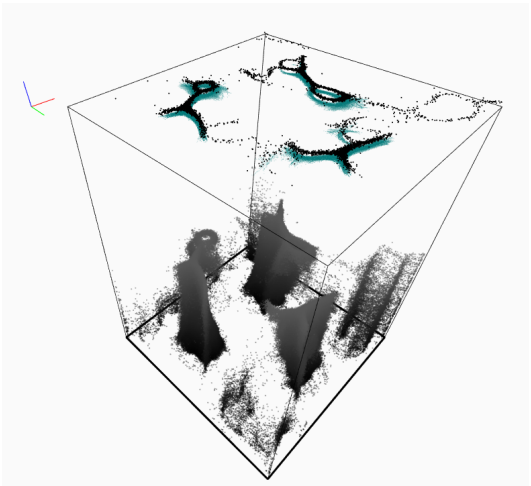
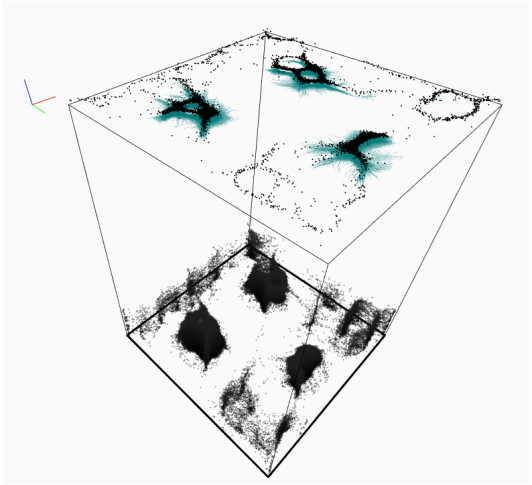
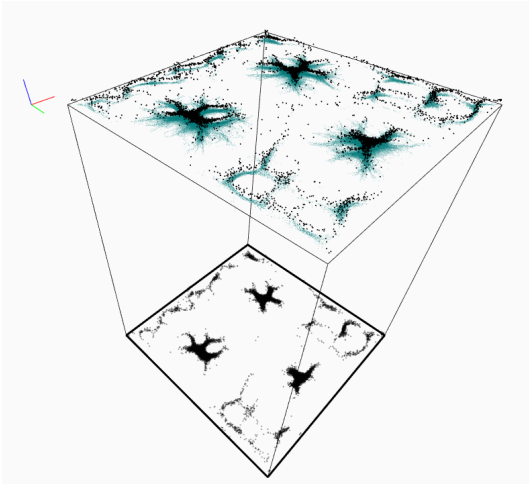


sec_H_2



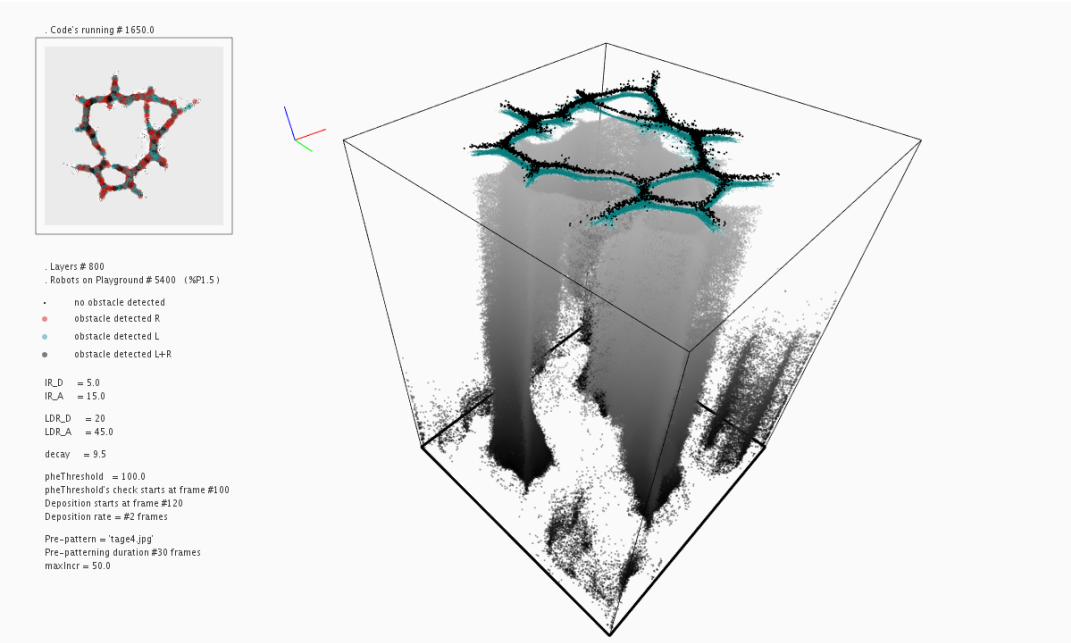
sec_H_3

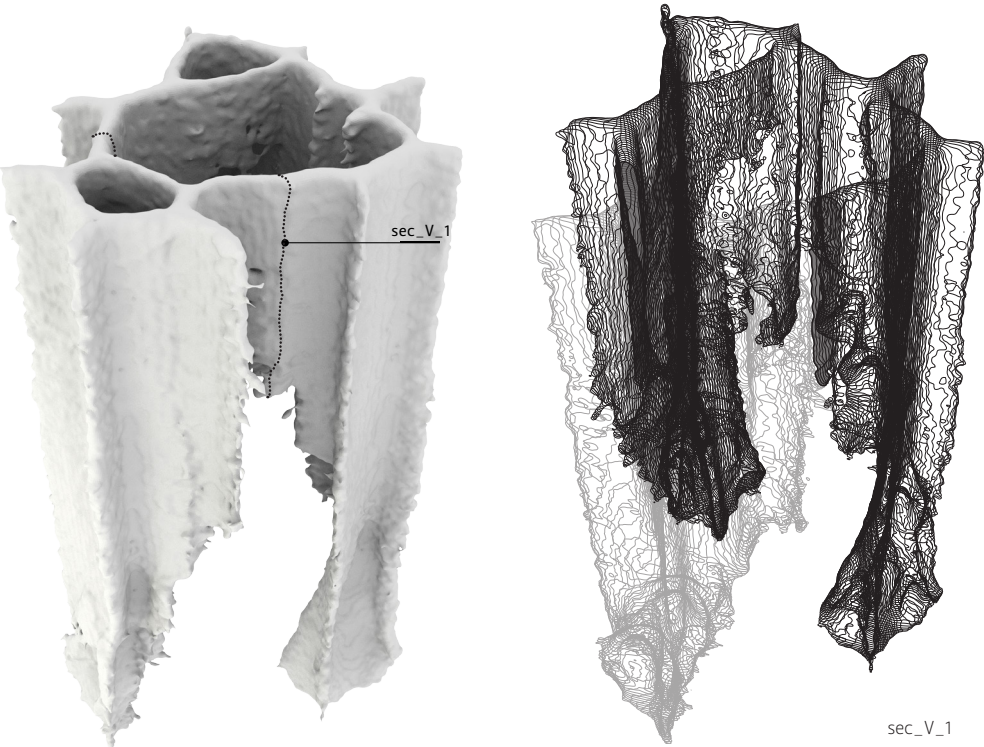
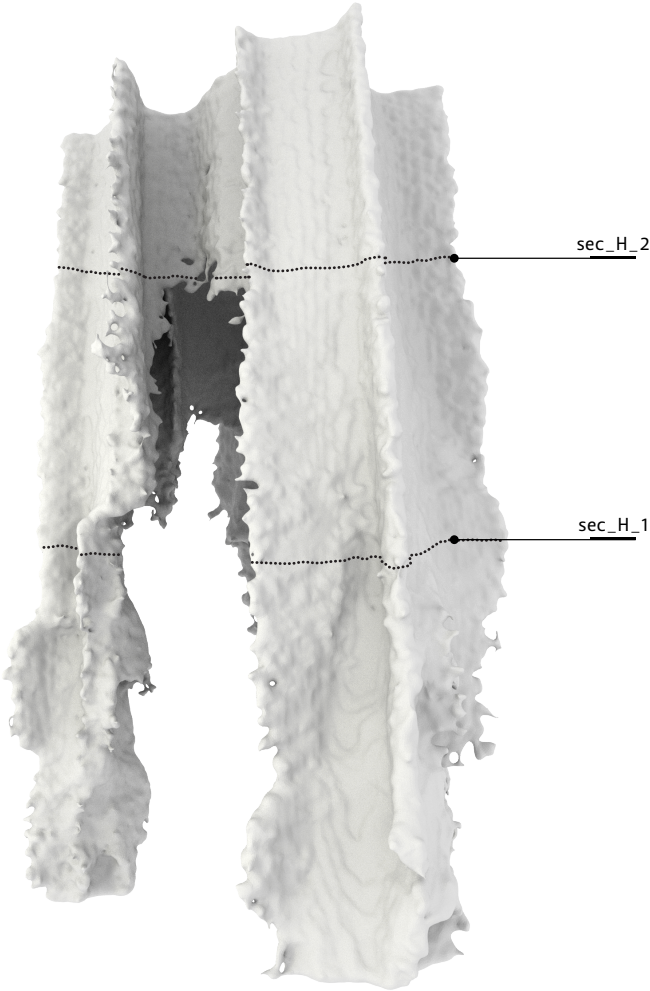






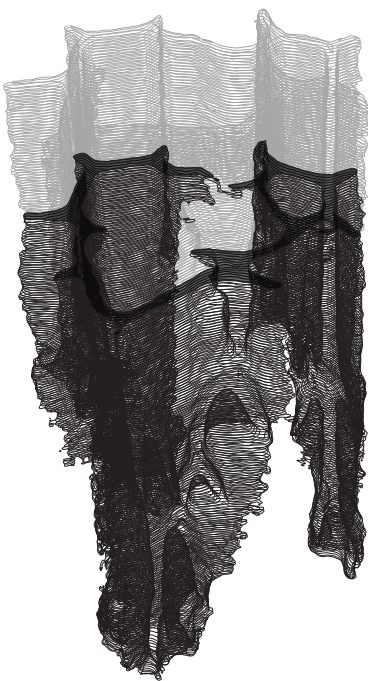
64 / Sequenze di formazione guidato da *pre-patterning*.
I toni di grigio del pattern sono rimappati tra *-maxIncr* e *+maxIncr*.



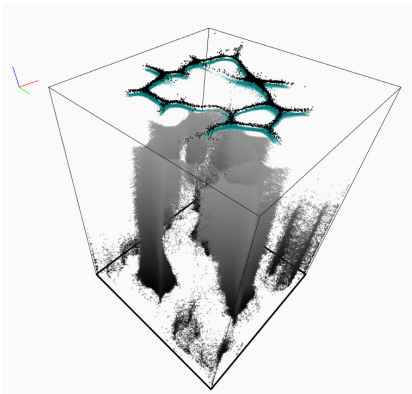
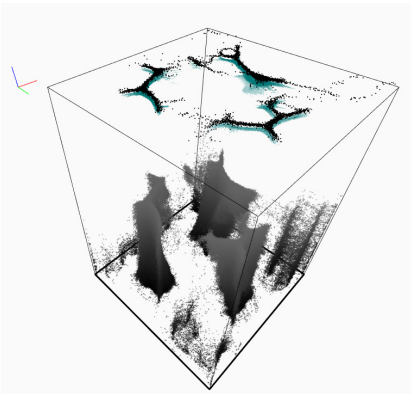




sec_H_1

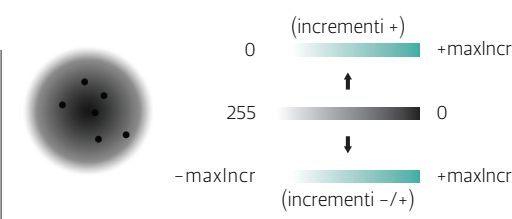


sec_H_2



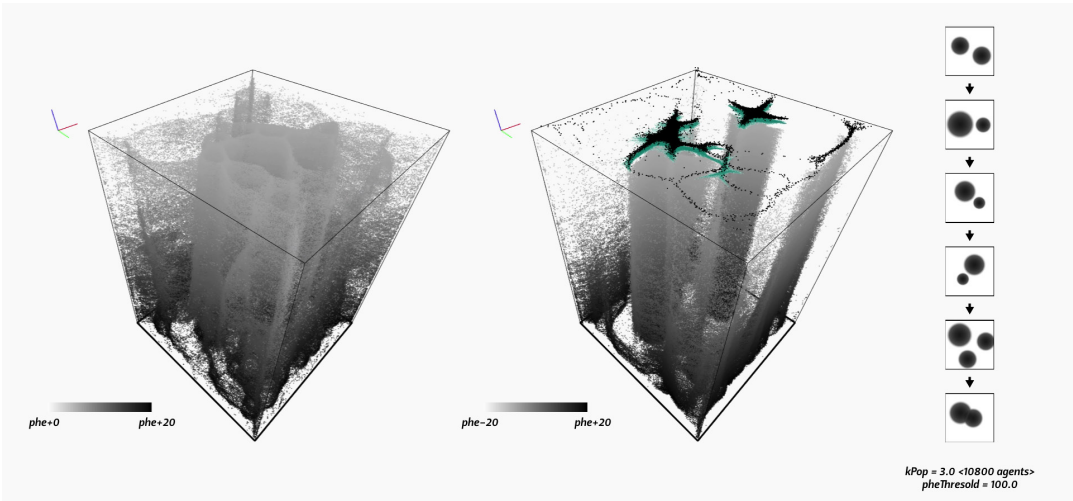
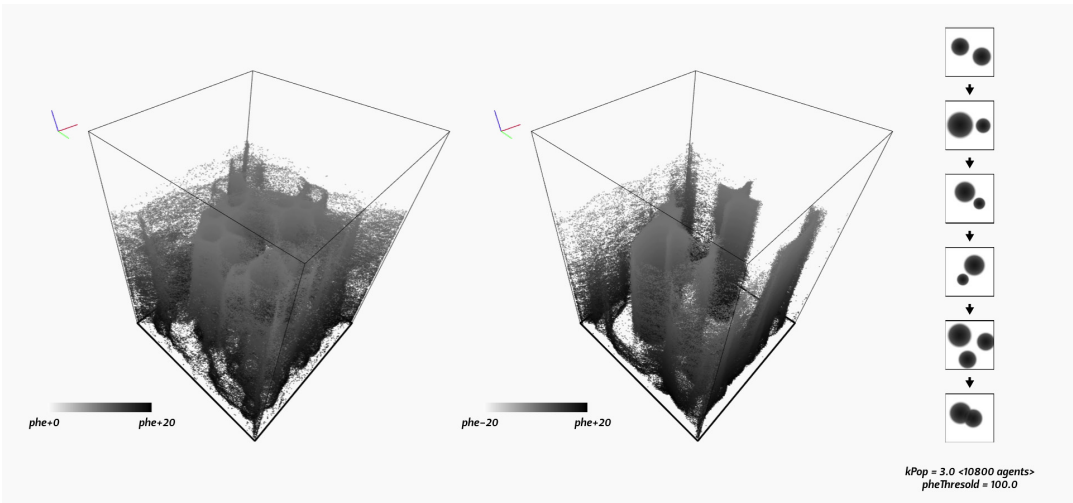
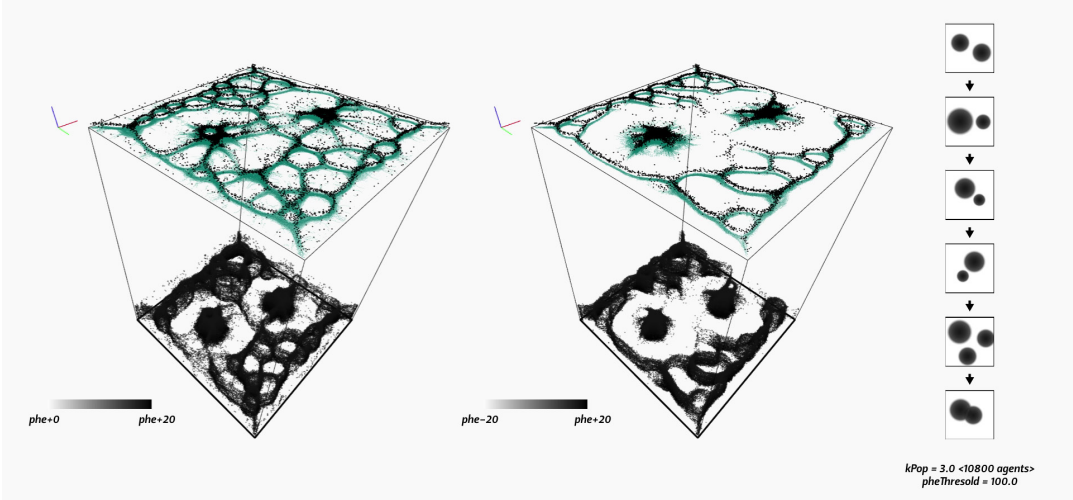
Sono ora proposte analisi comparative che accennano a studi parametrici da approfondire in futuro. Si mettono in relazione le sequenze *pre-patterning* con i range di mappatura degli stessi pattern di stimolo chemiotattico. L'entità dell'incremento di chemioattrattore che il codice interprete rileva sulla mappa del pre-pattern (immagine in scala di grigi) può essere maggiore o minore di zero a seconda del fatto che l'intervallo di variabilità dei grigi (il numero intero 0 corrisponde al nero, mentre 255 corrisponde a bianco) venga rimappato su un dominio che comprenda o meno numeri negativi⁶⁵. Ipotizziamo ad esempio che al bianco sia associato un valore di incremento nullo, mentre al nero sia associato un valore di incremento pari alla variabile *maxIncr*. Ad ogni tonalità di grigio, che quindi ricadrà entro i due estremi definiti dal bianco e dal nero, sarà associato un valore di incremento positivo maggiore di 0 e minore di *maxIncr*. Ipotizziamo, invece, di associare al bianco un valore di incremento pari a *-maxIncr*, e così al nero valore *+maxIncr*. In questo caso, si avrà metà scala dei grigi ai quali saranno associabili incrementi positivi di chemioattrattore, e la metà restante per i

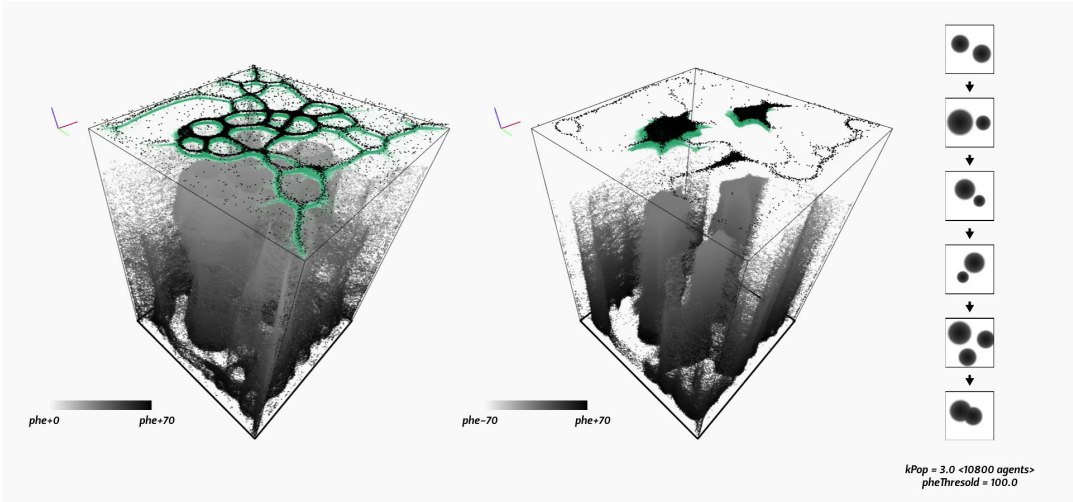
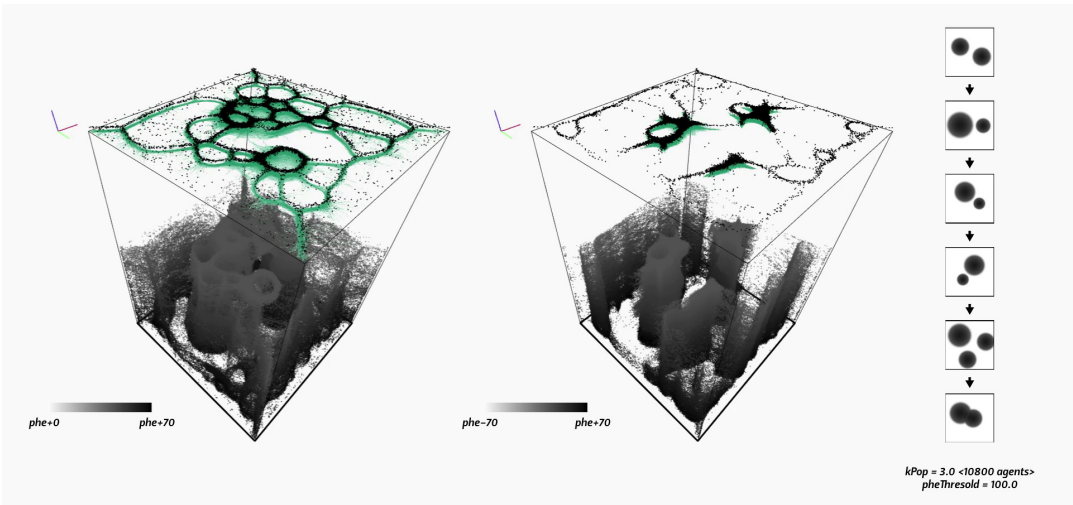
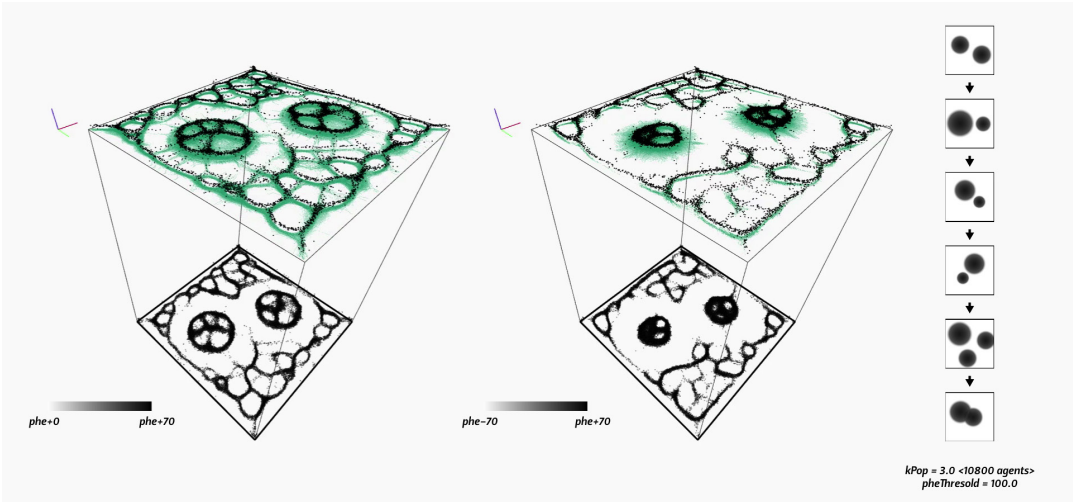
quali gli incrementi associabili saranno negativi. Queste due modalità operative – giustapposte nelle sequenze delle prossime pagine – mostrano capacità distributive della materia percepibili in costruzioni dai caratteri ben distinti. Diventa importante quindi strumentalizzare questa plasticità del sistema, cercando di esplorare le soluzioni che possibili ibridazioni dei due metodi possono fornire ⁶⁶.

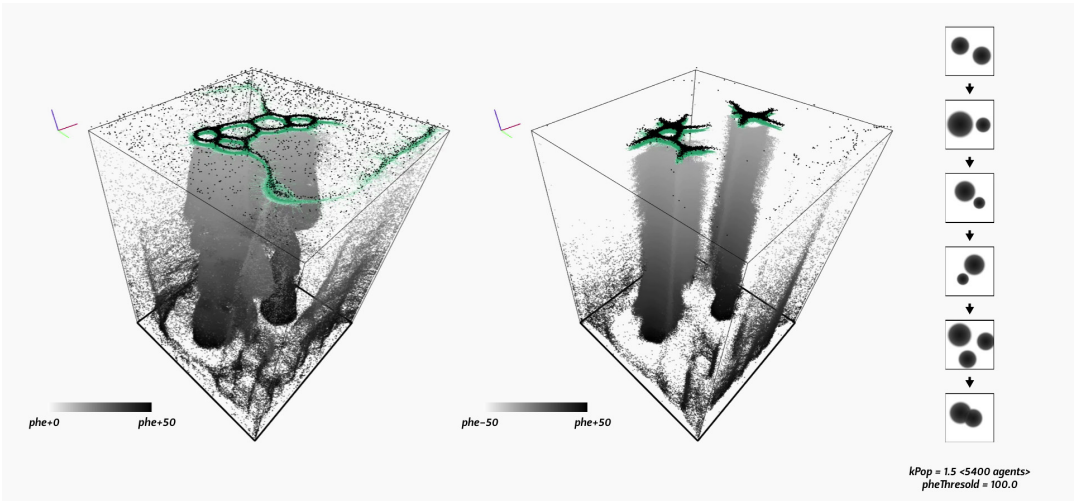
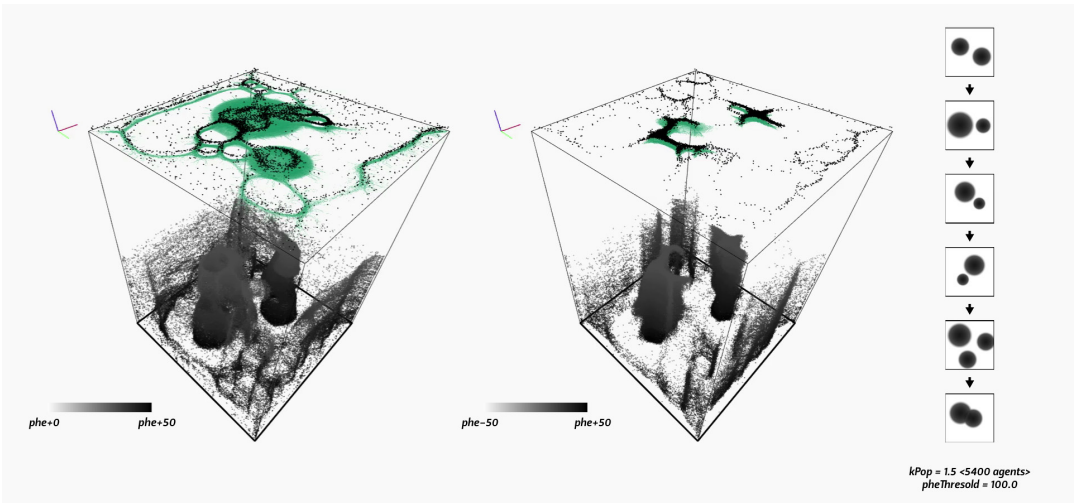
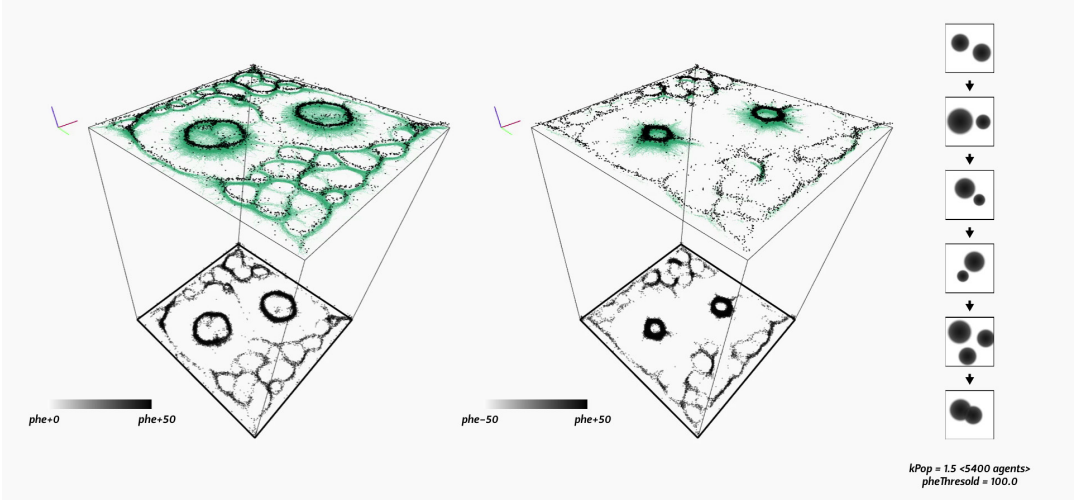


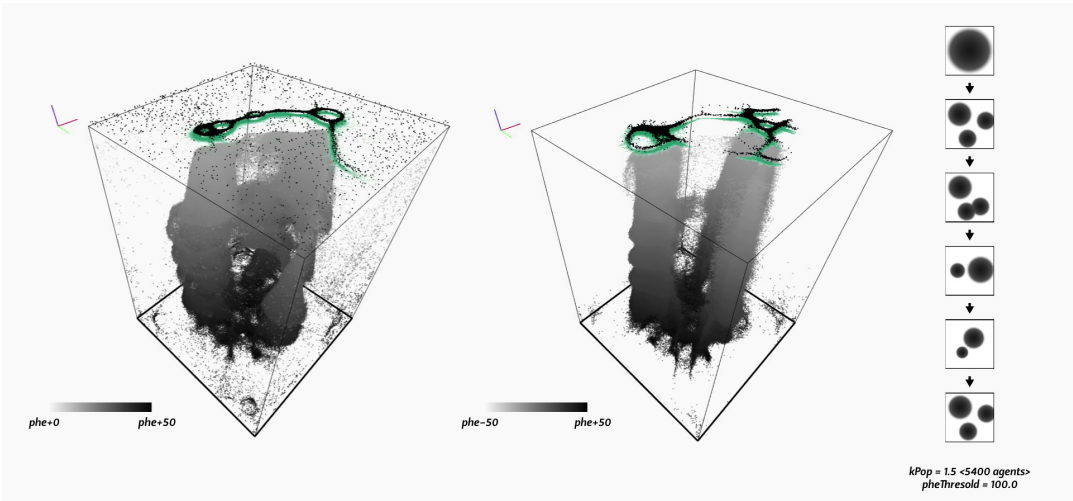
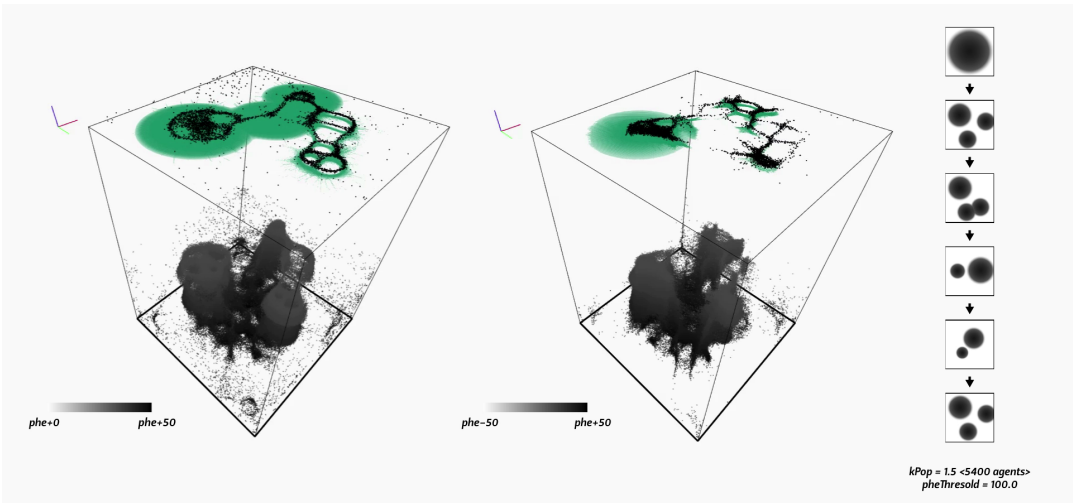
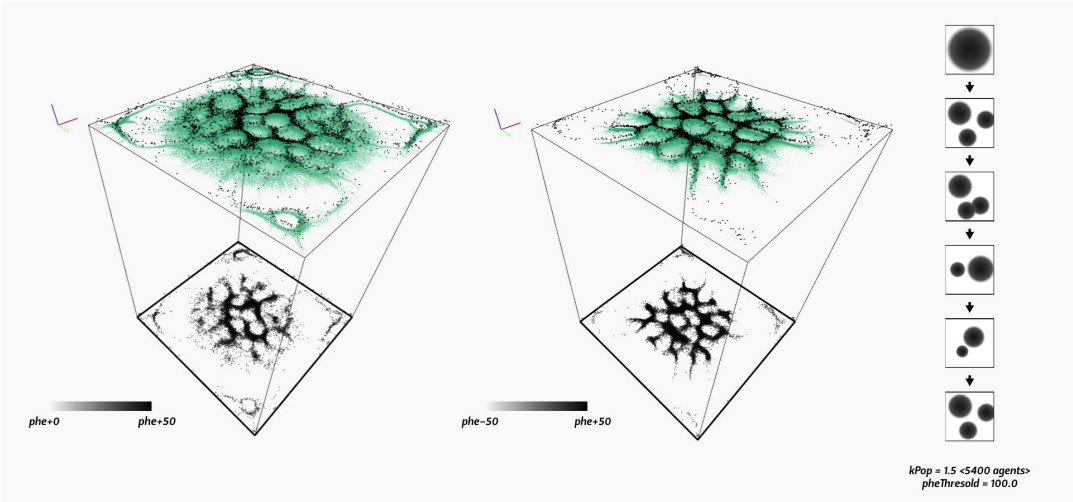
65/ In alto, si mostra la duplice modalità con cui il codice interprete analizza il pre-pattern, definendo i valori di incremento per il *layer traccia*.

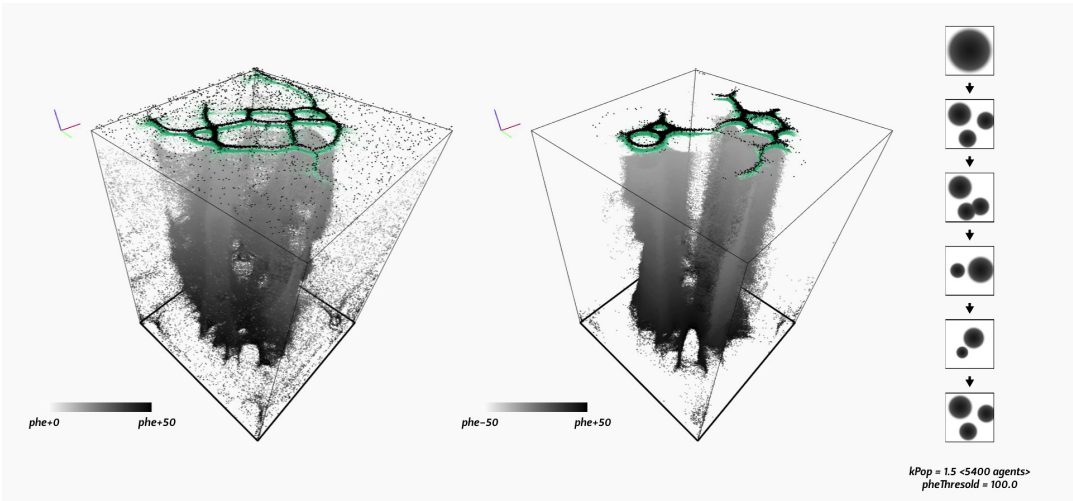
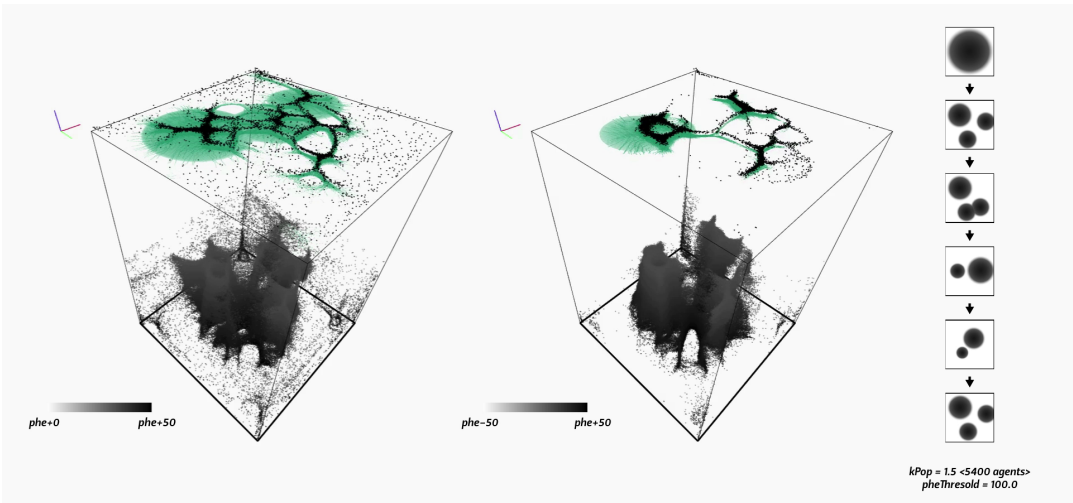
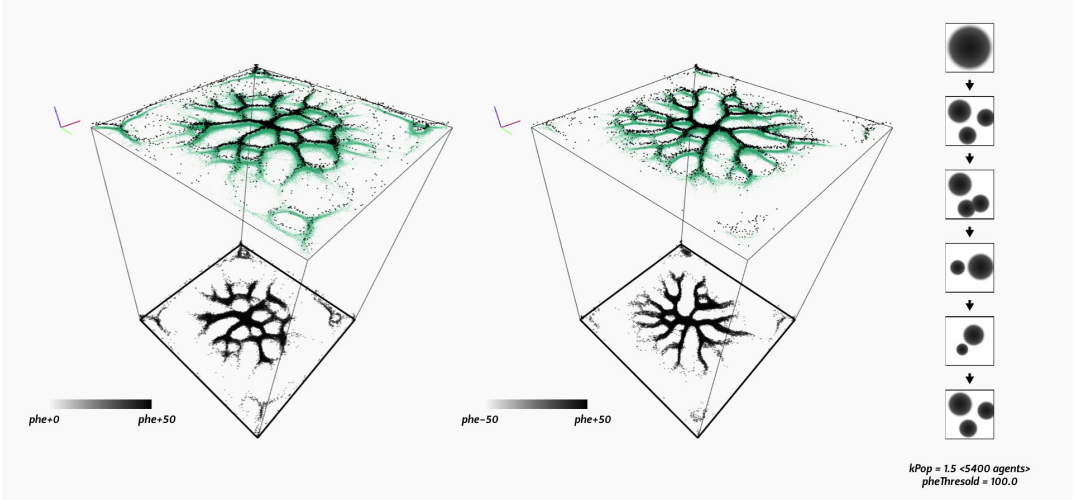
66 / Nelle pagine seguenti sono riportate le sequenze di costruzione (visibili come nuvole di punti) guidate da *pre-patterning* che viene rimappato in domini positivi (colonne di destra) oppure in domini misti positivi/negativi (colonne di sinistra).

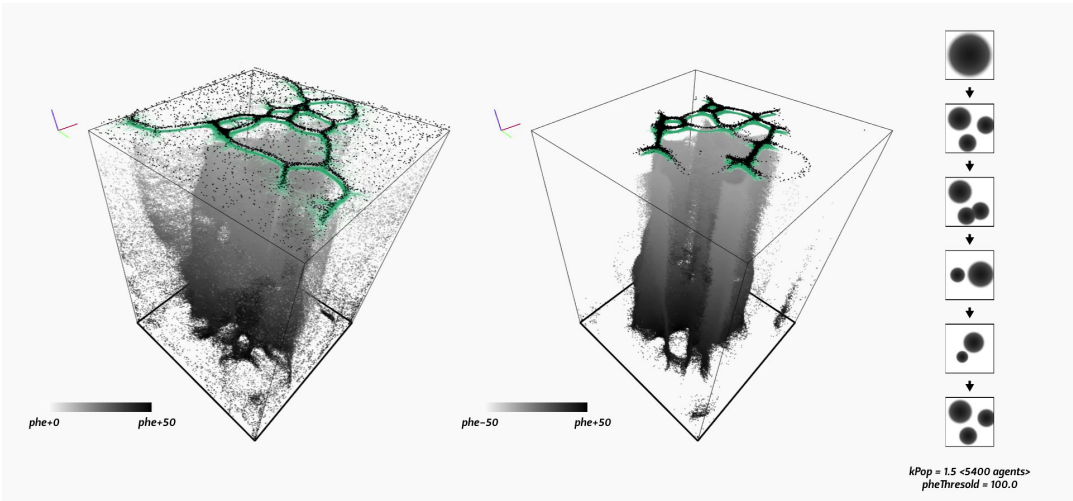
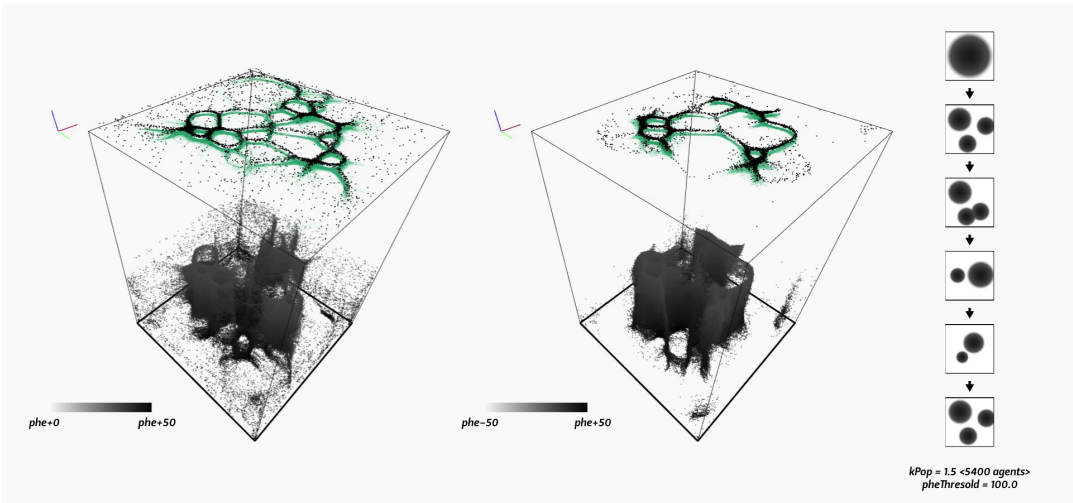
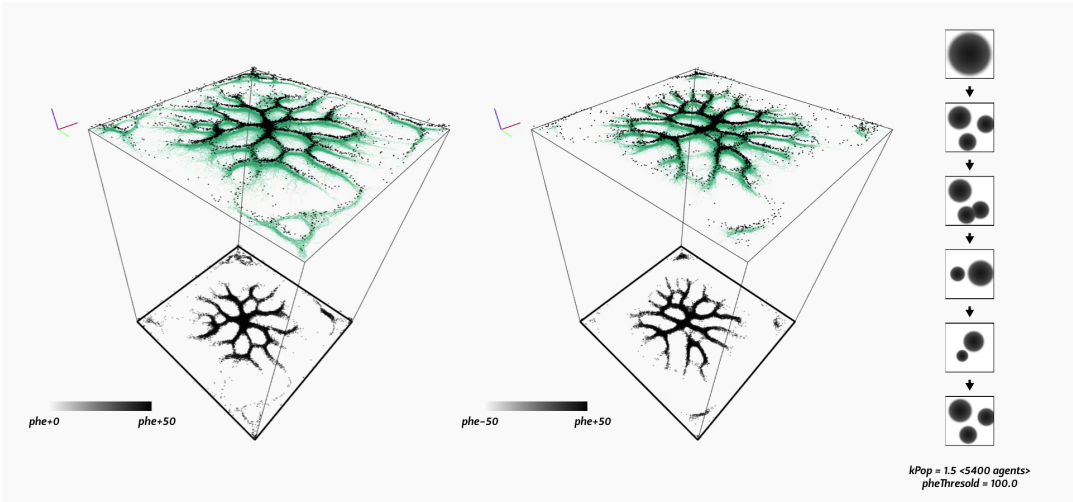


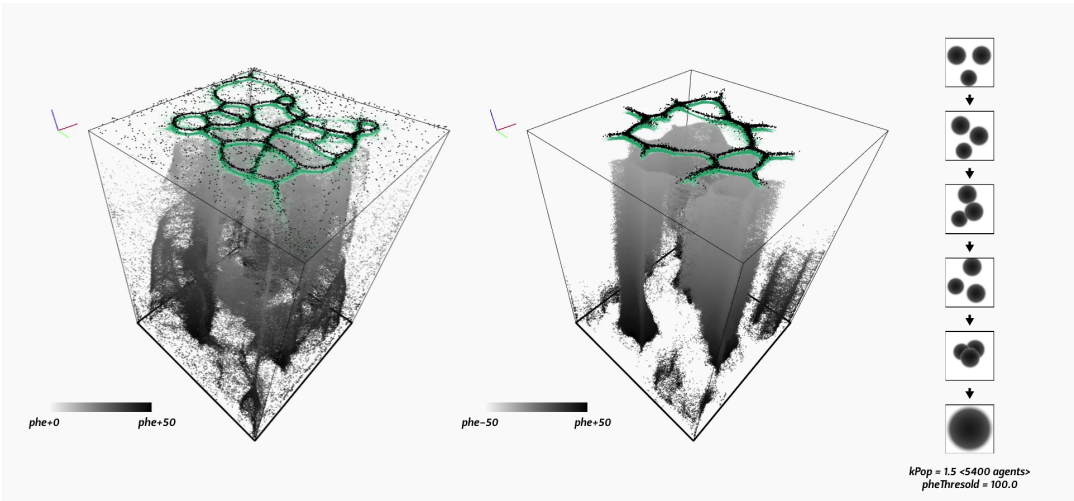
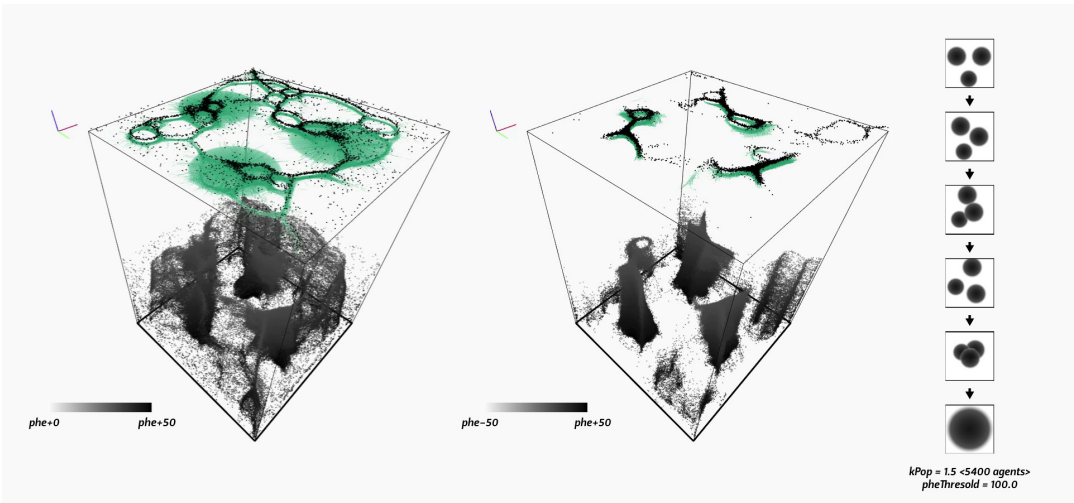
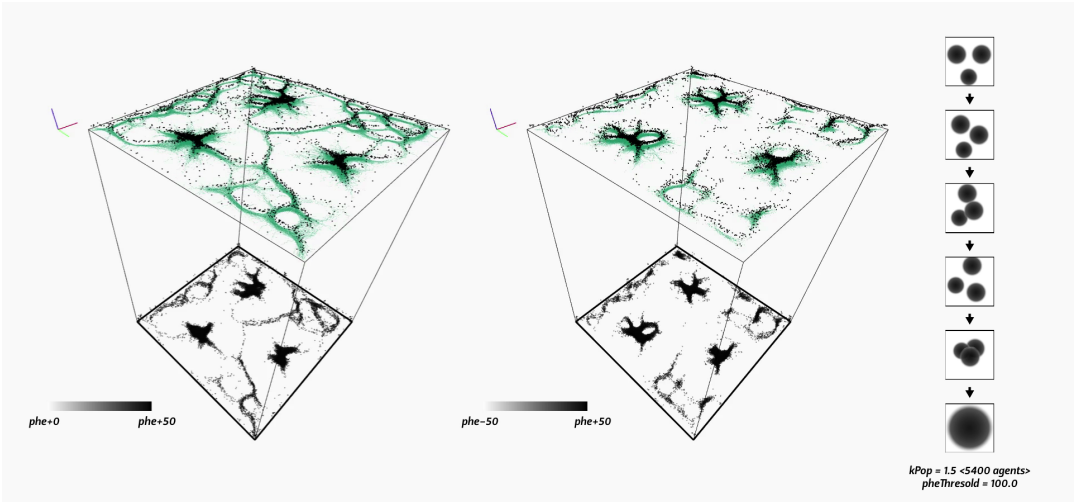


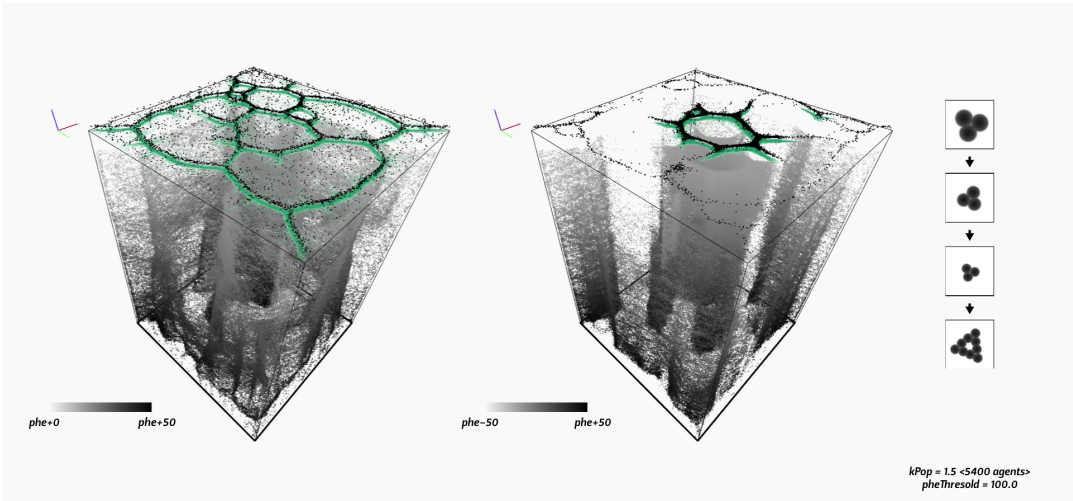
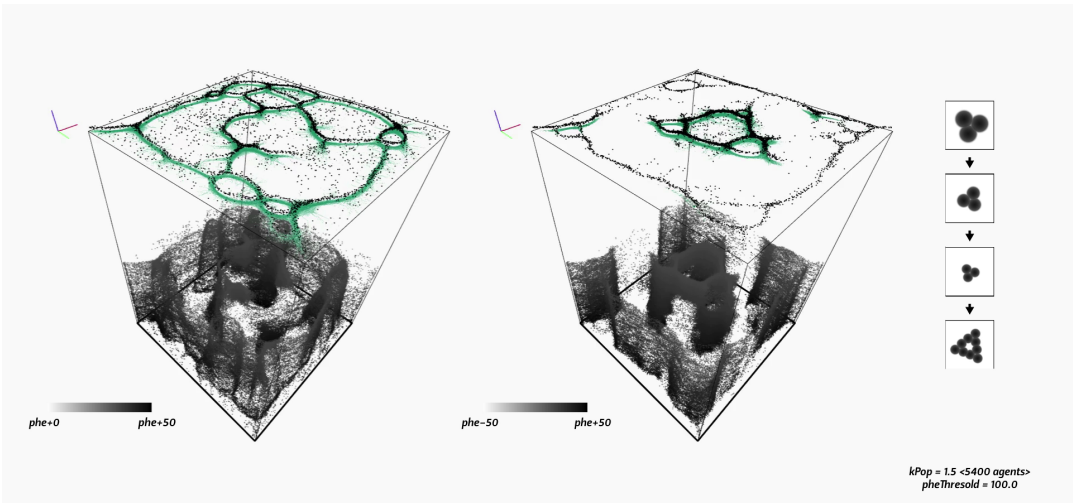
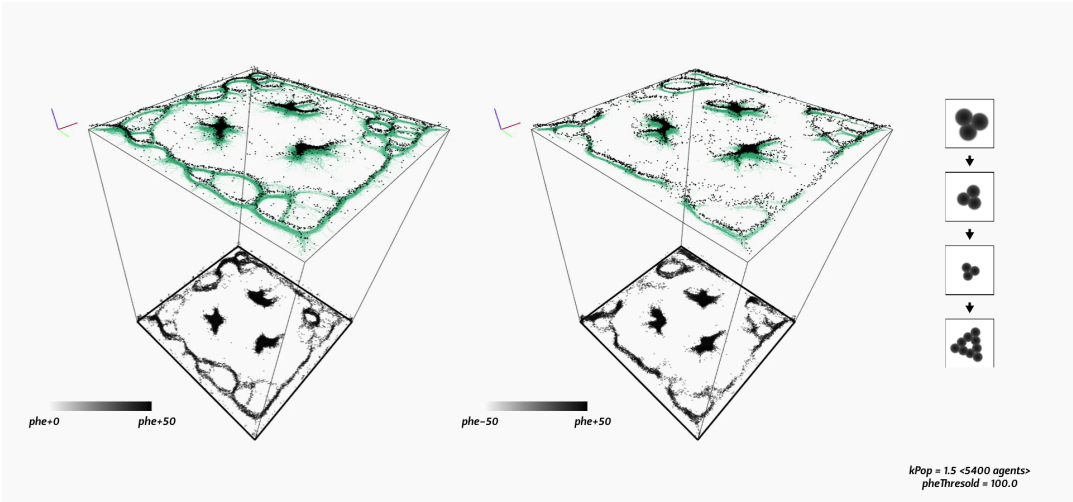








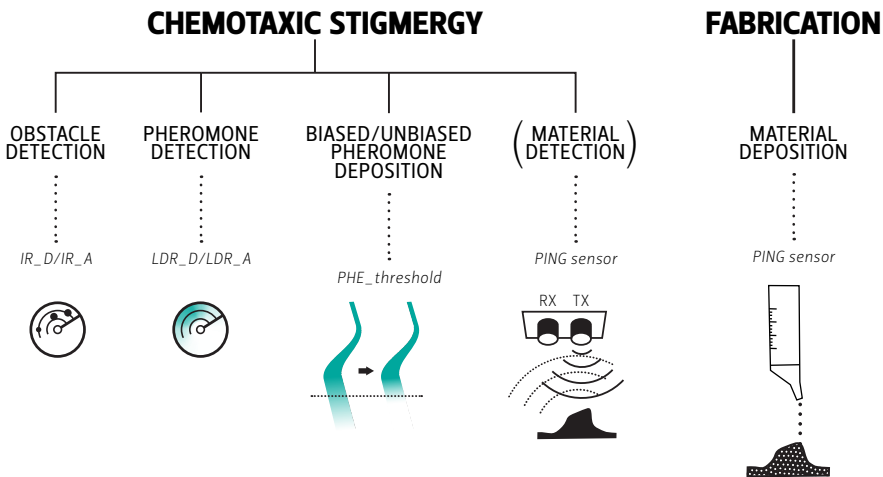






67 / In alto. Il sensore di prossimità ad ultrasuoni funziona sul principio del Sonar: emette impulsi sonori ultrasonici, e rileva un'eventuale eco di ritorno generata dalla presenza di un oggetto all'interno della portata nominale (campo sensibile).

Si vuole far notare come la stigmergia -codificata e incorporata nelle componenti hardware che costituiscono l'agente robot- possa essere estesa mediante l'utilizzo di sensori capaci di rilevare la presenza di materiale depositato a terra. Come introdotto in fase di simulazione, la presenza di rilievi già formati sull'area in corso di costruzione costituisce un layer informativo di tipo ambientale interpretabile dal robot estendendone la dotazione sensoristica. Si è definita *material detection* questa nuova abilità cognitiva che è stata solo abbozzata nel prototipo robot: la sperimentazione hardware di questa strategia si è interrotta in quanto, già durante test preliminari, il sensore di prossimità a ultrasuoni si è rivelato particolarmente inaccurato in fase di lettura (a causa dell'irregolarità delle superfici di rimbalzo dell'eco)⁶⁷. La *material detection* è perciò segnalata tra le strategie da codificarsi in una eventuale riprogettazione robotica che voglia aggiungere un ulteriore livello alla gerarchia che produce la complessità del sistema stigmergico chemiotattico.



PCB

La necessità di contenere il costo unitario per robot ha richiesto la progettazione e realizzazione di una scheda elettronica in sostituzione dell'Arduino utilizzato fino a questo punto per mettere a punto un ideoneo firmware.

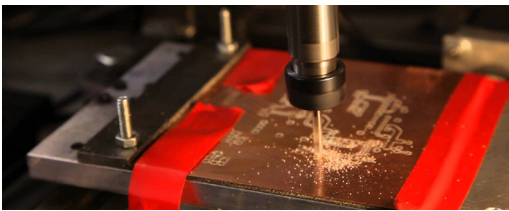
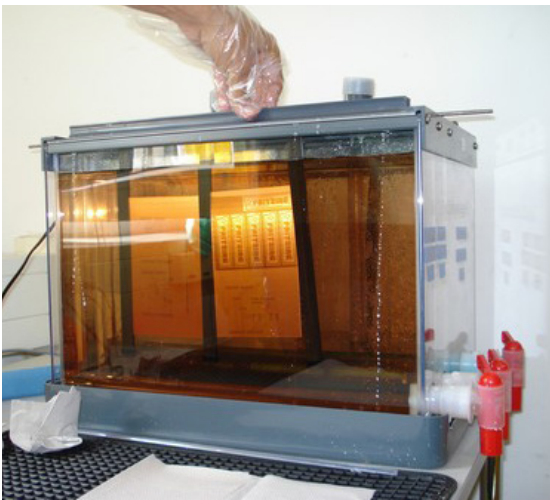
Esistono diversi approcci per la realizzazione di circuiti stampati ⁶⁸ (printed circuit board – PCB):

1. *incisione con acido*: è il metodo più utilizzato sia per grandi lotti di produzione che per circuiti prodotti a livello amatoriale in pochi esemplari. Si tratta di una tecnica sottrattiva: l'acido è usato per rimuovere le porzioni di rame indesiderato da una lastra prefabbricata. Applicando una maschera temporanea sulla lastra, alcune parti vengono protette dall'attacco dell'acido, lasciando intatto lo strato di rame necessario al circuito. Esistono due tecniche: col *trasferimento diretto del toner* il tracciato del circuito viene stampato da una stampante laser su carta disposto capovolto sulla lastra. Passando sopra i due elementi un ferro da stiro, si trasferisce così il toner dalla carta al rame. La *laminazione tramite fotoresist* prevede invece che la maschera venga stampata su un foglio trasparente o lucido, per essere poi esposto ad una lampada UV, sviluppandosi sulla lastra.

2. *rimozione selettiva di rame*: è simile al processo di incisione. Esistono più tecniche per rimuovere il rame da una basetta rivestita: le più comuni sono l'instradamento delle piste (trace routing) tramite fresatura controllata (CNC milling) e l'ablazione del rame con potenti laser.
3. *deposizione*: esiste una grande varietà di tecniche che aggiungono rame sulla basetta. Alcune sono basate sulla tecnica della galvanizzazione (*electroplating*), altre utilizzano inchiostri conduttivi per definire le piste del circuito.

Considerata la complessità esecutiva dell'*electroplating*, ma pure la rapida deperibilità delle vernici conduttive utilizzate come alternativa, è sconsigliabile praticare scelte produttive orientate sull'approccio additivo.

68 / Le tre metodologie di produzione di circuiti stampati: incisione per mezzo di immersione in un bagno acido, fresatura meccanica CNC, *electroplating* (galvanizzazione).



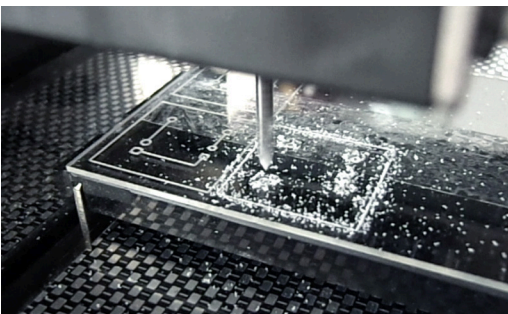
A partire da un generico circuito disegnato con *Fritzing*⁶⁹ ho dedotto alcuni tracciati vettoriali che sono stati la base di un preliminare lavoro di fresatura con la *Roland iModela iM-01*⁷⁰, gentilmente messa a disposizione da MakelnBo. Su basette di plexiglass (PMMA) di 86x55 mm spesse 1mm sono stati effettuati alcuni test del processo di fresatura: pur senza un effettivo progetto delle piste da isolare si sono valutati qualitativamente gli effetti della variazione di parametri come la profondità di incisione in funzione della lame montate (punta a V 45° e 30°), incremento di profondità passo-passo (taglio, incisione, foratura sono processi che la fresa svolge in più iterazioni – modalità detta *multi-passing* –, evitando che la lama venga sollecitata in modo eccessivo).

La scoperta che la progettazione del circuito, da svolgersi con software specifico come *Eagle PCB*⁷¹, sarebbe stata impedita da problemi nell'importazione di Gcode entro il software di

comunicazione con la *iModela*, ha imposto un drastico ripensamento sul flusso di lavoro. La *iModela* non sarebbe più potuta essere la fresa con cui produrre la PCB.

Eagle PCB è diventata la piattaforma software di progetto del circuito in quanto una produzione home-made delle schede tramite rimozione controllata del rame intorno le piste sarebbe stata impossibile con *Fritzing*: questo software non permette infatti di ricavare tracce di offset alle piste, impedendone dunque lo “scontornamento” che le isola all'interno del circuito.

Con *Eagle*, una volta predisposto il progetto dello schema elettrico (sviluppato interamente da Massimo Cicorella), se ne sono regolate le caratteristiche in quanto scheda fisica. Si sono cioè assegnate le caratteristiche dimensionali di piste, pad, fori passanti... e tutto quanto necessario ad alloggiare le componenti che sono poi state successivamente saldate sulla superficie della lastra di vetro e rame.



69 / *Fritzing* è un software libero per la progettazione elettronica (EDA) focalizzato sul passaggio da semplici prototipi (basati sulla breadboard) al circuito stampato da inviare alla produzione.

70 / La *iModela iM-01* è un fresa desktop a 3 assi prodotta da Roland. Permette di lavorare cera, resina, legno chimico e materie plastiche tra quelle più diffuse. Possono essere utilizzati diversi tipi di mini frese per fare tagli, forare, modellare.

71 / *Eagle PCB* di CadSoft è un software disponibile in modalità freeware. Analogamente a *Fritzing* è utilizzato per la progettazione di circuiti elettronici.

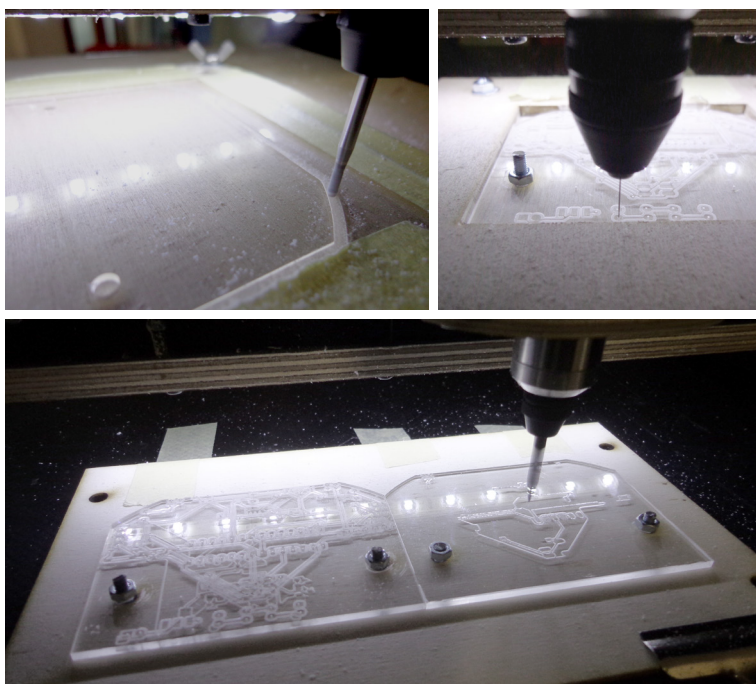


Una volta messo a punto il progetto dettagliato si è proceduto a generare un Gcode con *PCB GCode*, plug-in gratuito per EAGLE, che comanderà le operazioni di incisione, fresatura e foratura alla macchina a controllo numerico che si sarebbe scelta.

PowerWASP Evo è una stampante 3D prodotta dall'azienda WASP di Massimo Moretti. Tra i numerosi modelli di stampanti 3D disponibili sul mercato, solo alcuni operano in modalità combinata: procedendo ad una rapida modifica del supporto estrusore è possibile alloggiare sulla macchina un piccolo trapano che rende la macchina in una piccola fresa CNC. La scelta della macchina con cui operare l'incisione – e in particolare la conoscenza delle tolleranze e precisioni nei movimenti dei motori – è di fondamentale importanza per l'impostazione di parametri che generano il Gcode. Per procedere all'avvio della fresatura occorre specificare ulteriormente i parametri legati al progetto del circuito:

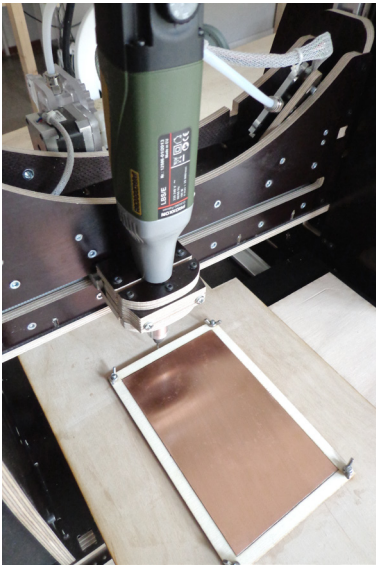
- distanze minime e massime di isolamento piste da effettuarsi ; mediante incisione;
- profondità massima di incisione;
- dimensione del bulino;
- altezza rispetto la Z di origine dei ritegni della lastra;
- profondità di foratura e dell'eventuale pre-foratura;
- tempo di permanenza della punta forante 'a fondo';
- velocità dei motori X, Y, Z

L'effetto combinato di questi parametri ha ovviamente ripercussioni sulla qualità del prodotto finale e dunque sono stati effettuati test intermedi su lastre di plexiglass⁷² prima di passare alla lavorazione definitiva su vetronite e rame.



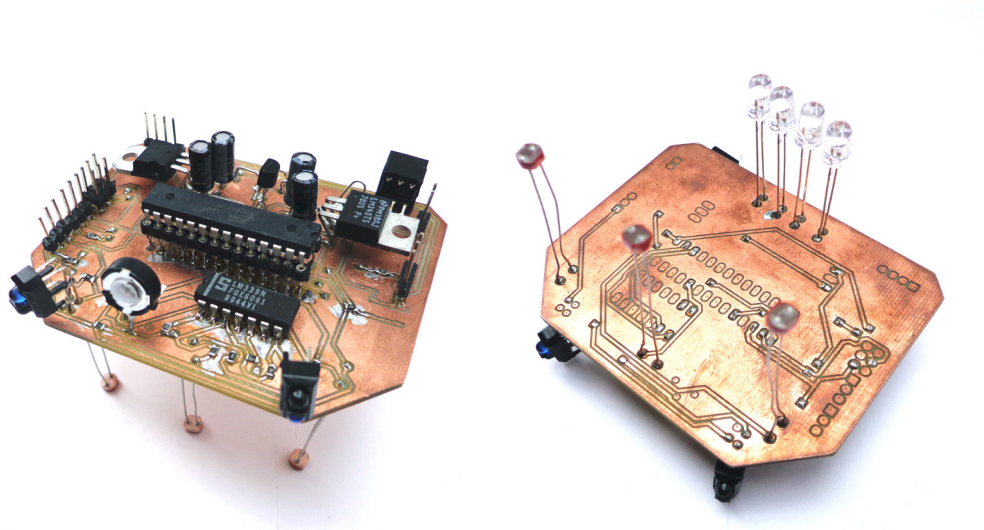
72 / La lavorazione viene effettuata in tre fasi, con tre distinte frese da montarsi sul mandrino del trapano. La prima permette di isolare da una lastra di plexiglass la forma della PCB. Si procede poi allo scontornamento delle piste con un bulino a V con inclinazione variabile tra i 30° ed i 45°. Questa operazione va effettuata su entrambi i lati della basetta: è fondamentale sviluppare un sistema di fori di allineamento (realizzati con bulloni M4, ben visibili nell'immagine in basso) grazie ai quali sovrapporre con precisione le piste disposte sui due layer, pena il disallineamento dei fori che verranno di seguito realizzati. Infine, con una punta di 0,3 mm, si procede alla foratura passante dei *vias* connettenti le piazzole del circuito *top layer*, con quelle del circuito *bottom layer*.

73 / E' stato realizzato un apposito piano sacrificale per la lavorazione su vetronite, dotato di un piccolo telaio smontabile per allineare le lavorazioni sui due lati della basetta, dunque evitando la realizzazione di fori di allineamento. In basso, un dettaglio dello scontornamento delle piste sulla basetta di vetronite.



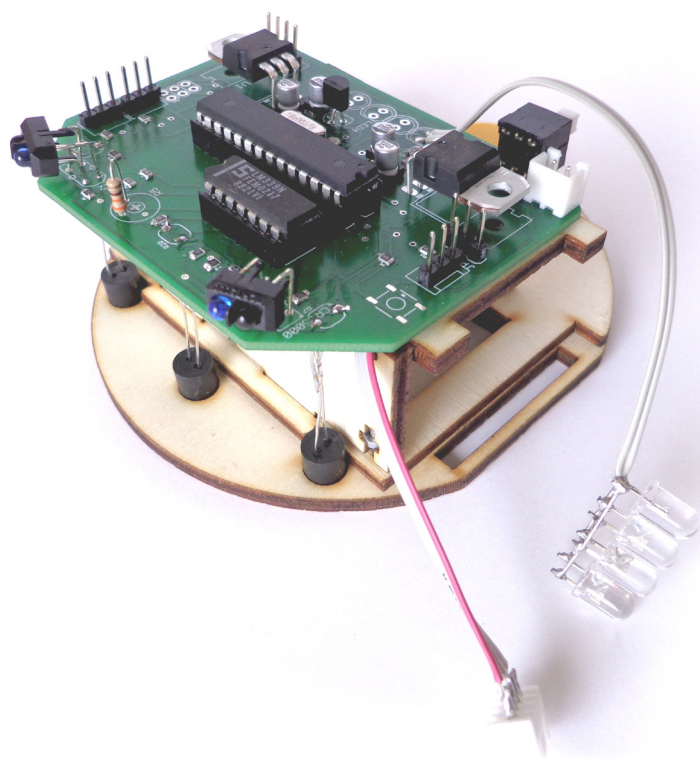
Ulteriormente, si sono valutate le complicazioni conseguenti la realizzazione delle PCB in modalità *dual-layer*: le piste in questo caso si sviluppano su entrambe le superfici della lastra (*top e bottom layer*) e sono collegate da fori passanti detti *vias*. La complicazione risiede nel mantenere allineati questi *vias*, e, più in dettaglio, i fori e le piazzole che collegano sui due layer. Considerato che la propagazione dell'errore deve essere cumulativamente contenuta entro frazioni del decimo di millimetro (i fori passanti sono stati realizzati con punte di diametro 0,1 mm), non è stato affatto immediato pervenire a soluzioni sufficientemente precise.

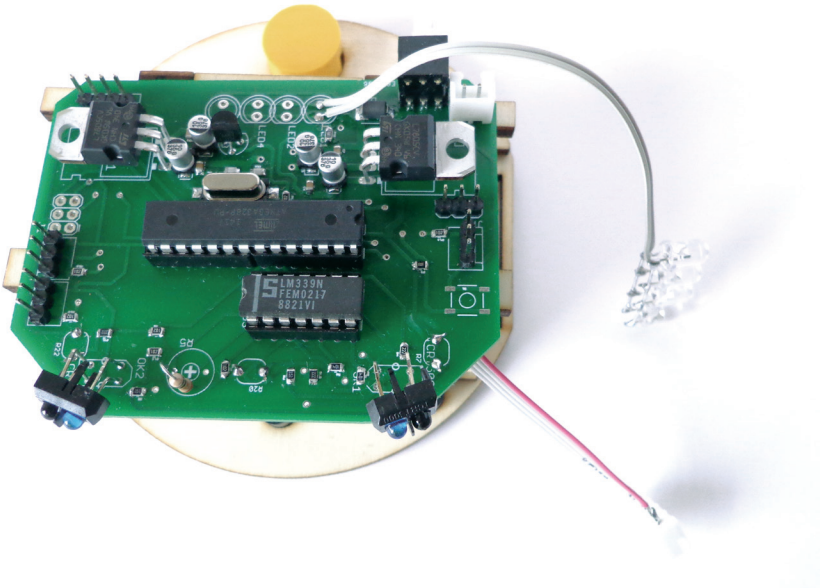
Sono stati dapprima realizzati telai di allineamento solidali al piano sacrificale ⁷³: una volta terminata la lavorazione da un lato della lastra, il ribaltamento e le procedure di fissaggio, insieme alla nuova definizione della origine X-Y davano luogo a propagazione di errore non tollerabile. Si è allora progressivamente individuato come soluzione quella che combina fori *fiduciali* (da 3 mm si è passati a 0,1 mm, disposti in maniera simmetrica rispetto l'asse baricentrico verticale) e un parsing del gcode relativo alla lavorazione bottom, utile ad evitare lo spostamento – e dunque un piccolo errore – della punta della fresa cnc. Il parsing, sviluppato appositamente con codice scritto in Processing, ha permesso di editare i valori delle coordinate macchina modificando la posizione relativa del percorso macchina rispetto l'origine che rimaneva così identica per *top e bottom layer*.



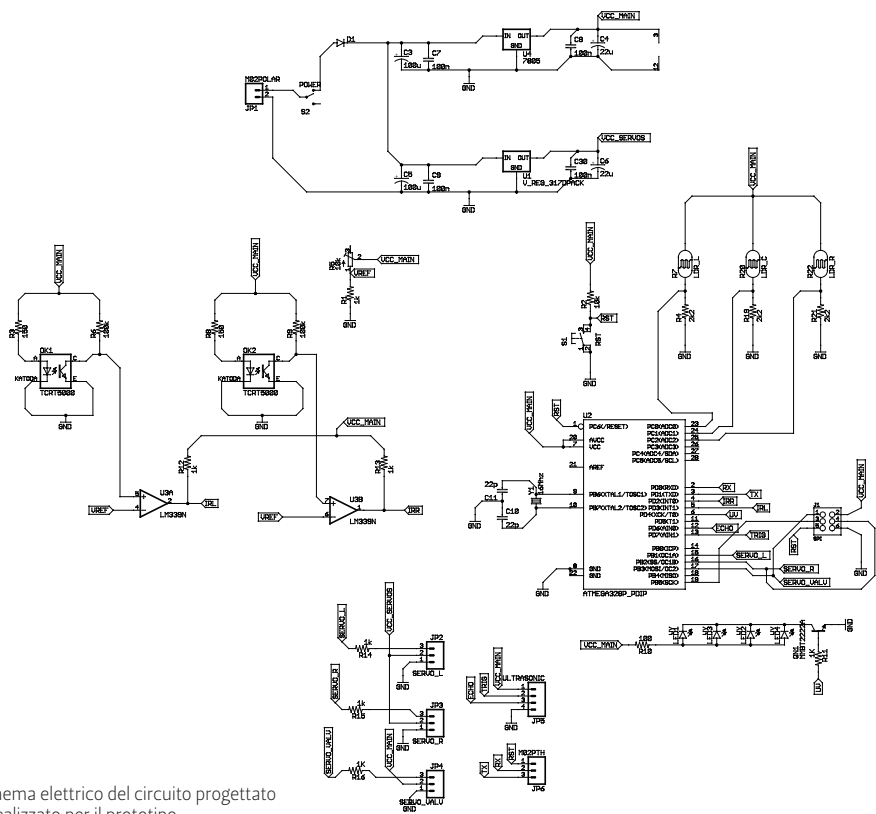
I lunghi tempi di prototipazione di schede DIY ⁷⁴ a cui si sarebbe andati incontro per la produzione di più esemplari della scheda elettronica, insieme ad una difficile gestione dell'errore (qui da contenersi al di sotto di frazioni centesimali di mm) permessa da una macchina a controllo numerico come la WASP, sono state le ragioni per le quali si è poi ricorso ad un servizio professionale di produzione di PCB ⁷⁵.
Va riconosciuto, nonostante tutto, l'utilità della prototipazione autoprodotta appena descritta: attraverso la meticolosa attività di *debugging* ⁷⁶ su questa prima scheda realizzata, si è difatti escluso ogni errore potenziale contenuto nel progetto del circuito, procedendo così senza rischi alla produzione tramite service esterno.

- 74 / Sopra. Vista *top* e *bottom layer* della PCB ottenuta mediante fresatura su basetta in vetronite: i componenti elettronici sono poi stati alloggiati e saldati.
- 75 / Sotto e pagina accanto. La PCB prodotta tramite service on-line.
- 76 / L'individuazione di eventuali errori di circuitazione o causati dalla scelta di componenti elettronici non adeguati.

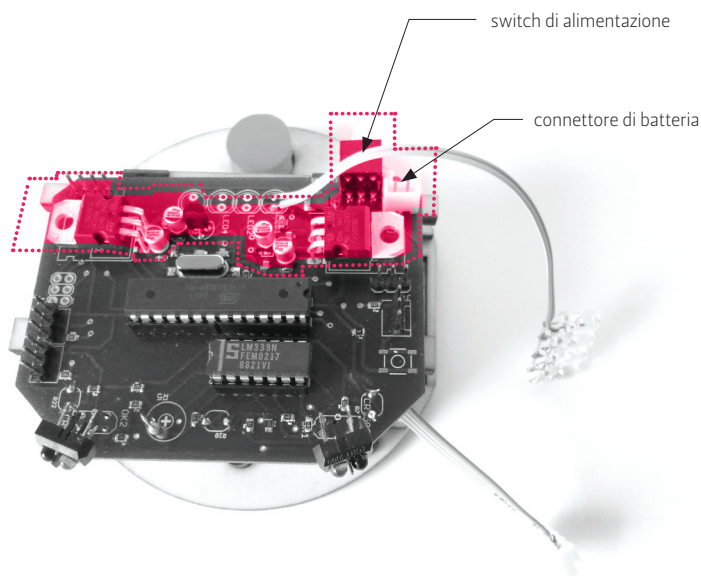
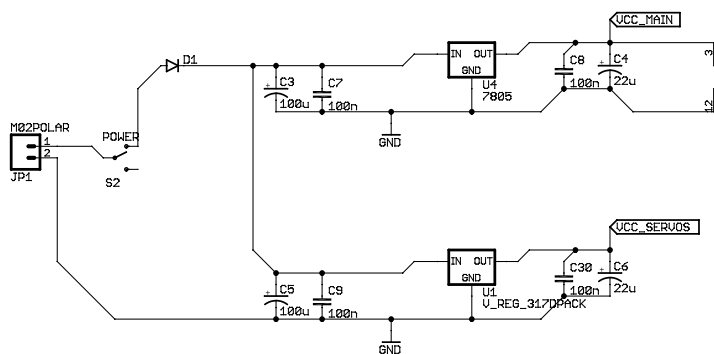




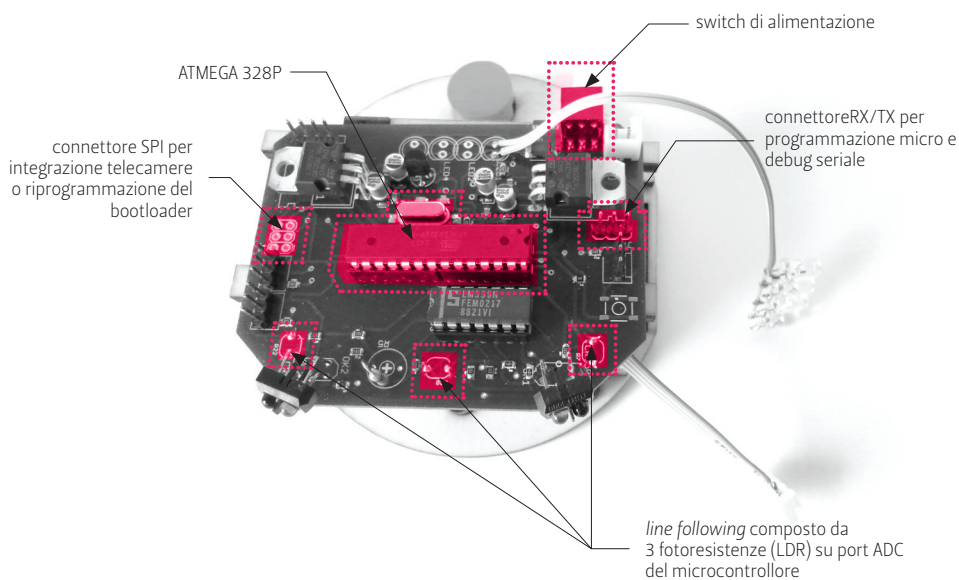
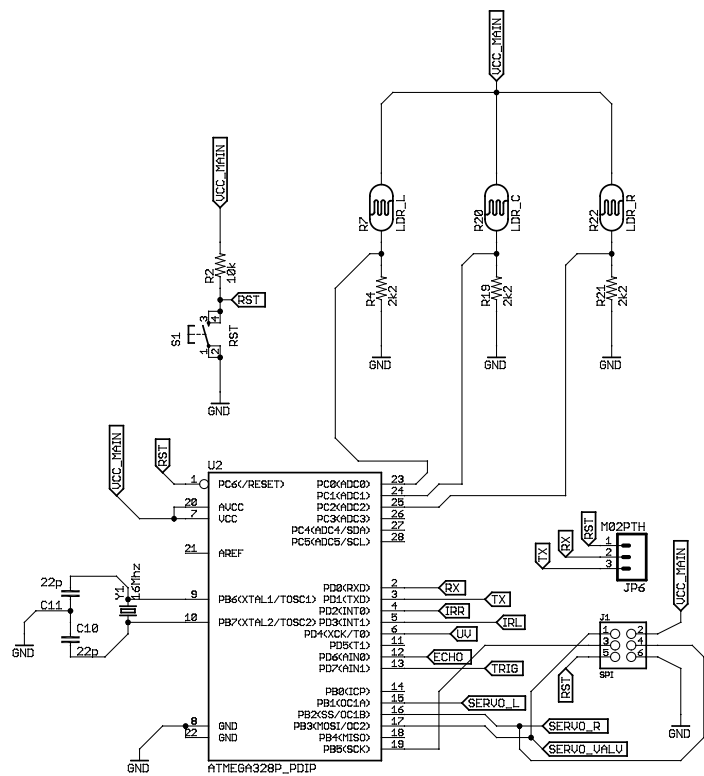
Le pagine seguenti riportano una sintesi tecnica delle parti costitutive la PCB progettata per il prototipo robot ⁷⁷.



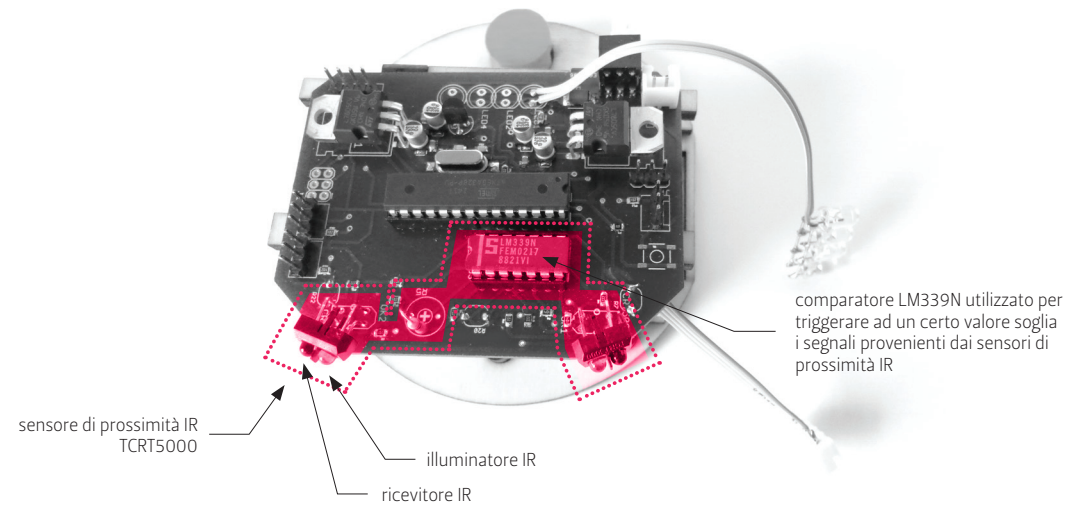
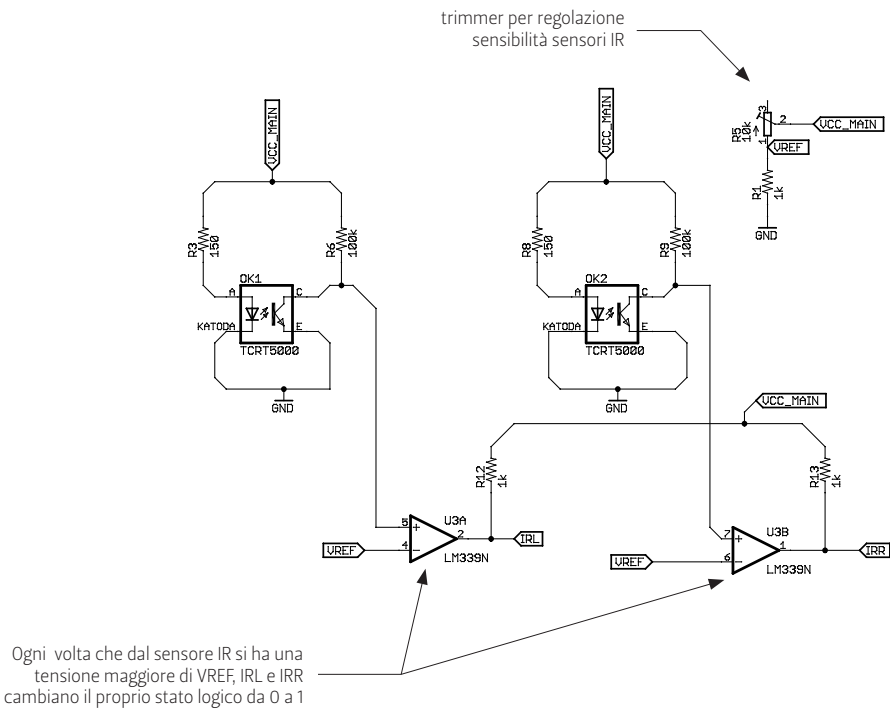
77 / Schema elettrico del circuito progettato e realizzato per il prototipo

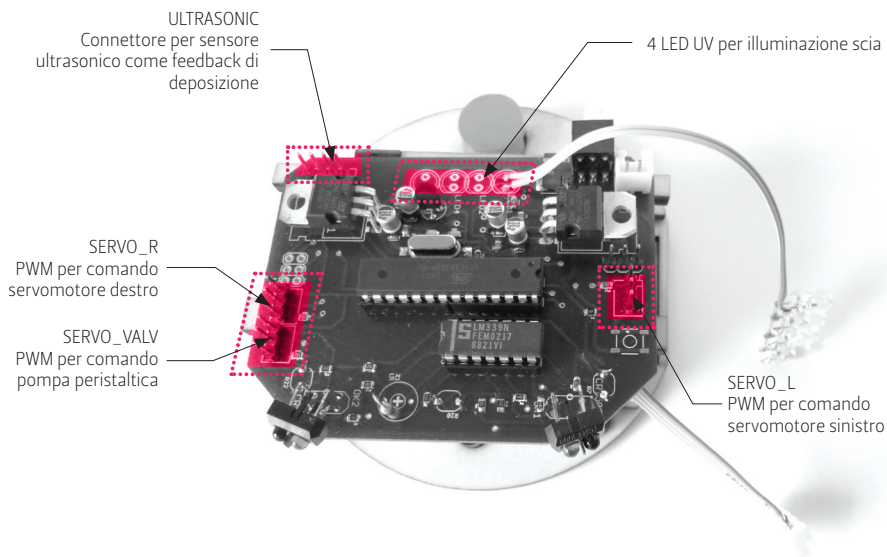
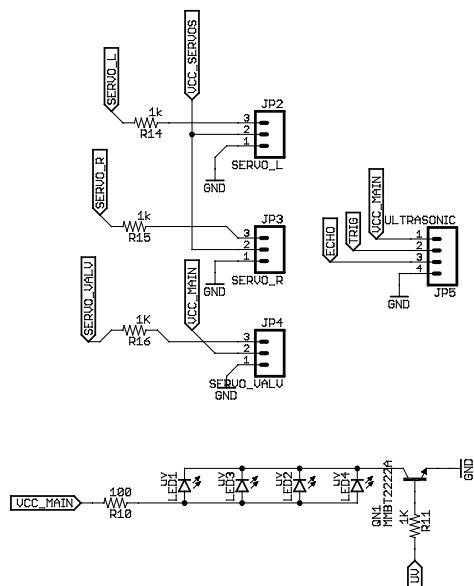


U1 e U4
alimentazioni separate per poter dividere i carichi degli
attuatori (servomotori) dal carico della CPU.
Serve a limitare il rumore di commutazione e assorbimento
dei servomotori sugli ingressi ADC del microcontrollore.



Line Following composto da 3 fotoresistori connessi in voltage divider sulle porte ADC del microcontrollore. Le fotoresistenze variano il proprio valore resistivo con legge inversamente proporzionale all'intensità della luce incidente.





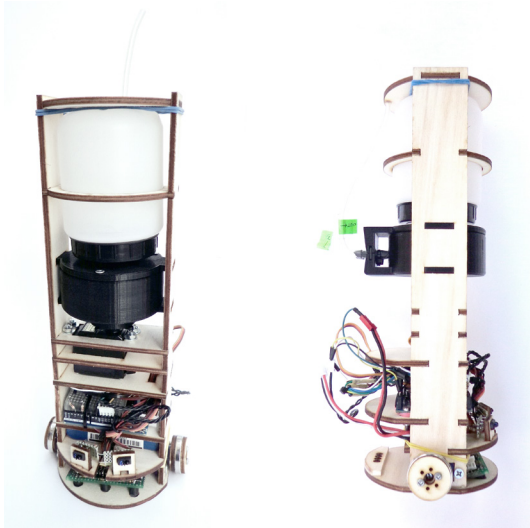
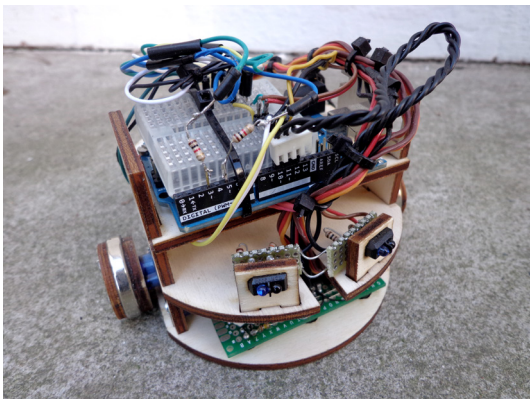
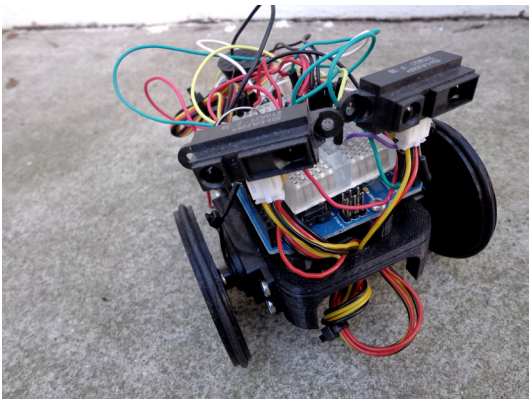
EVOLUZIONE DEI PROTOTIPI

La prototipazione robotica ha occupato una notevole porzione del percorso di ricerca. Si sono succeduti diversi modelli in base allo stato di maturazione delle strategie che venivano trasferite dal corrispondente modello agente software. Il *prototipo esplorativo* ha permesso lo studio preliminare utile alla programmazione della guida di robot su ruote (*rover*). E' stato successivamente dotato di sensori IR che hanno abilitato la strategia di *obstacle avoidance*. Questo modello, ottenuto assemblando parti stampate in PLA tramite una stampante 3D, è stato sostituito con un modello più economico ottenuto dal taglio tramite CNC laser di fogli di compensato di pioppo da 4mm ⁷⁸. Rinunciando alla stampa 3D delle parti costitutive lo chassis, e preferendo una tecnica di taglio laser, le modifiche (numerossime) operate sui disegni di progetto si sono potute succedere senza

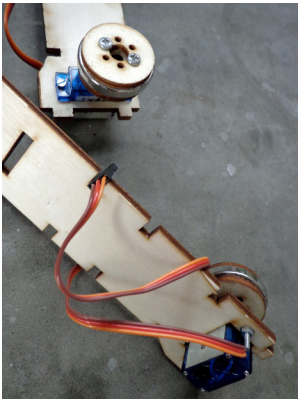
rallentamenti al processo di prototipazione. Le prime componenti elettroniche assemblate sulla base della specifica richiesta del progetto sono state alloggiati all'interno dello chassis che si è di volta in volta arricchito di nuovi livelli funzionali ⁷⁹. Le funzioni motorie, permesse dai due microservi alloggiati in fori ricavati sui fianchi del robot, sono disposti allo stesso livello del comparatore (il frammento di basetta forata su cui sono saldate le tre LDR) che viene incastonato su tre fori della base.

78 / A sinistra, il prototipo esplorativo. A destra, una versione più evoluta, ottenuta assemblando elementi piani in compensato di pioppo tagliato a laser.

79 / In basso e nella pagina accanto, la versione finale dell'unità robot integra il dispositivo progettato per la deposizione dell'acetato di sodio: il servomotore aziona la pompa peristaltica che preleva la soluzione contenuta nel serbatoio.

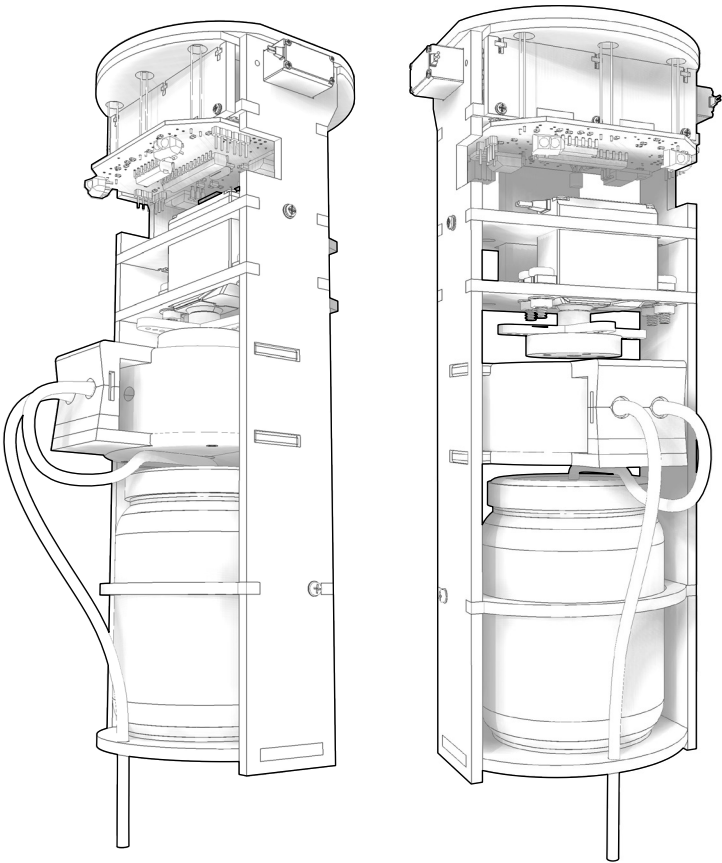


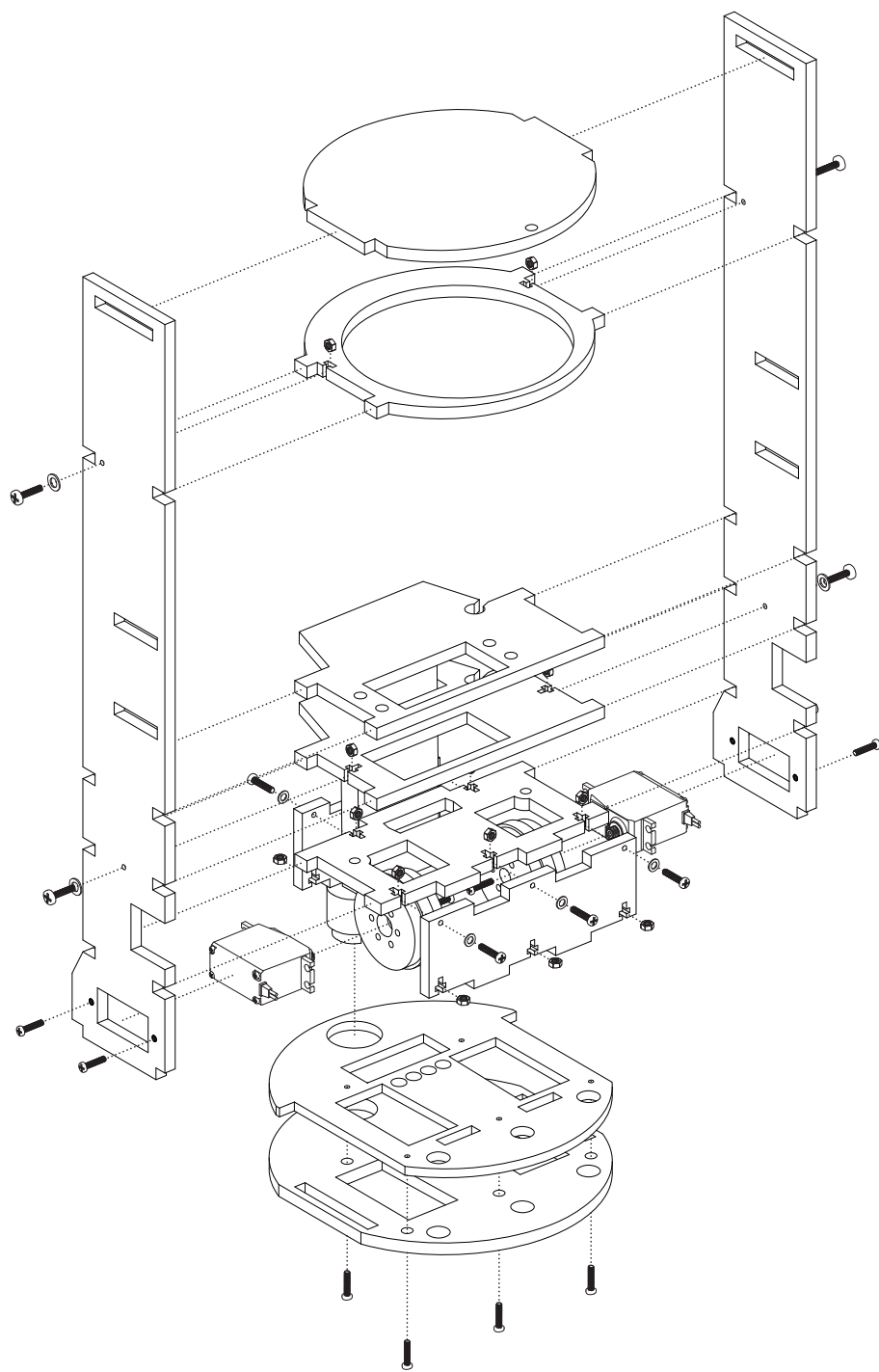
80 / Una vista di dettaglio dei microservi utilizzati dal robot per attuare il movimento su ruote. I tori magnetici di nichel- cadmio sviluppano una forza sufficiente a mantenere l'unità robot agganciata al piano metallico di lavoro.



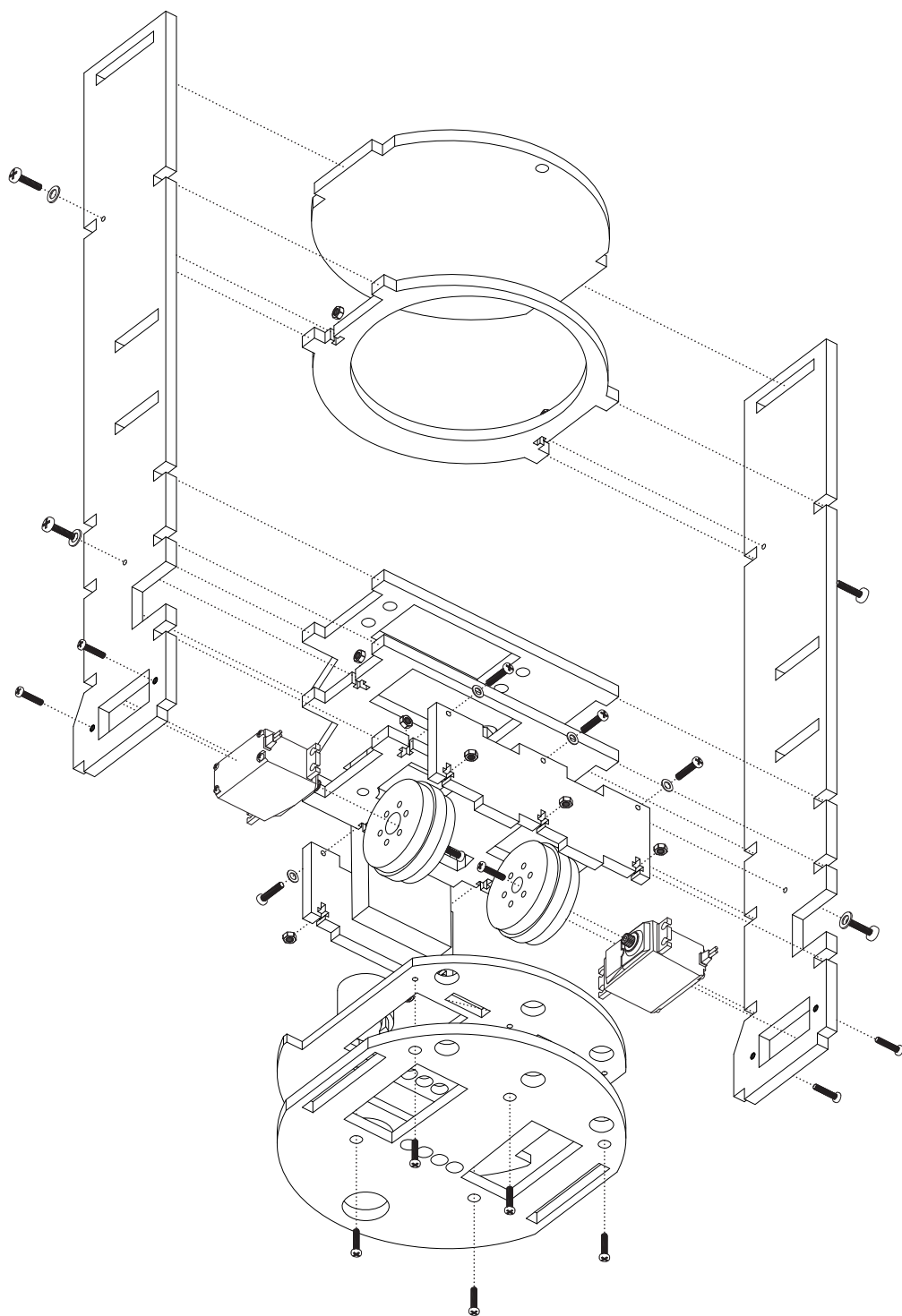
Anche i LED UV vengono inseriti in fori circolari tagliati a laser sulla lastra della base. Al livello superiore, si trova il reparto di alimentazione e due 'fanali' che alloggiano i sensori IR per la strategia di *obstacle detection*. In sommità viene sistemato l'Arduino che è il controllore input/output dell'unità robot. Questo prototipo intermedio vede la sostituzione delle ruote (precedentemente costituite da dischi in compensato o plastica gommati) con tori magnetici in nichel-cadmio così da poter rimanere agganciato al piano metallico durante il processo di fabbricazione ⁸⁰. La versione finale del prototipo incorpora le parti necessarie alla fabbricazione tramite deposizione del materiale che trasporta a bordo. Al sistema ad incastri e dentelli è stato infine affiancato un sistema di serraggio che utilizza viti e bulloni con filettatura M2 annegati nello spessore del compensato.

Nelle pagine seguenti sono riportate viste assonometriche raffiguranti il sistema di assemblaggio dello chassis ^{81,82}, i reparti funzionali che accolgono la PCB ^{83,84} ed il diposostivo peristaltico a completamento del prototipo finale ⁸⁵.

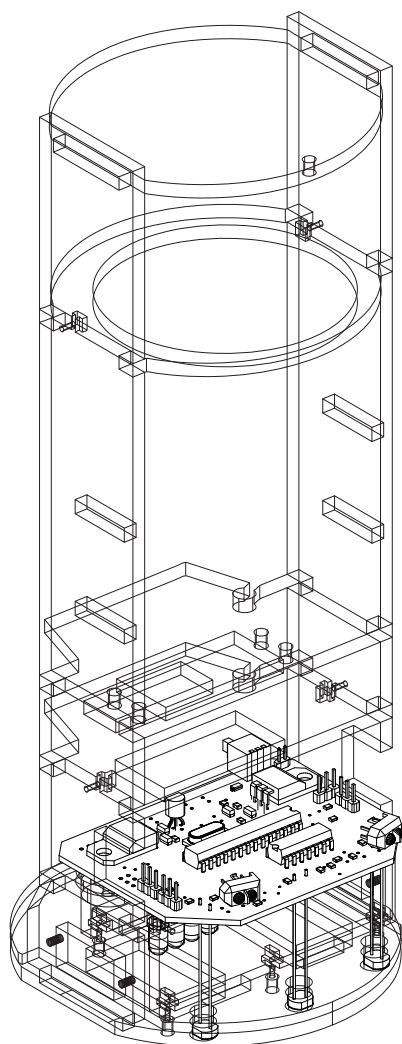




81 / Esploso assometrico: vista dall'alto.

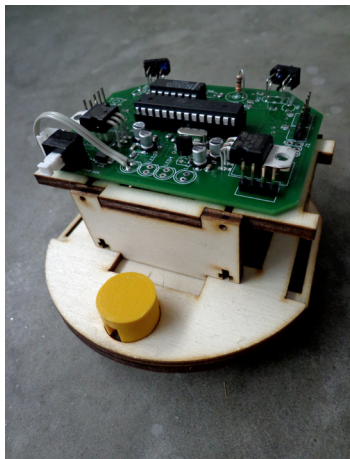
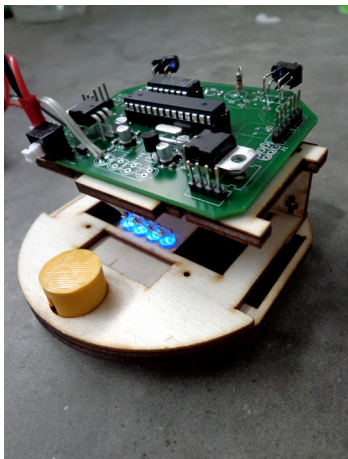
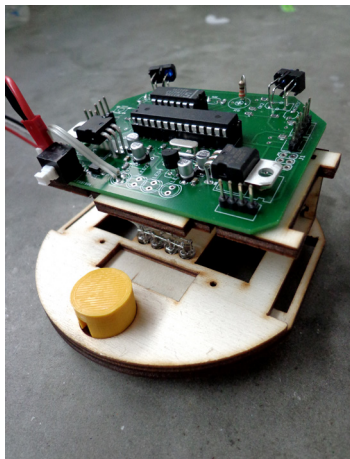


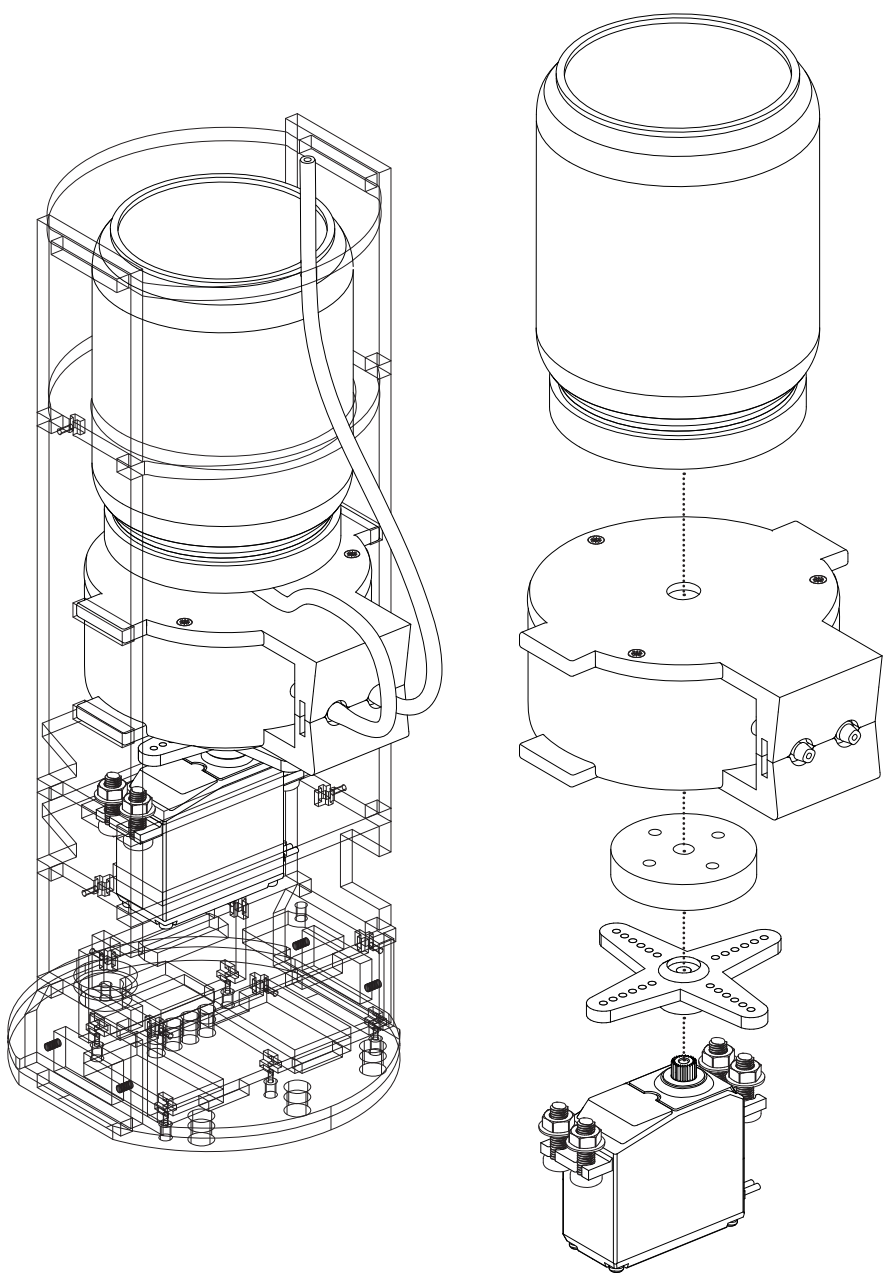
82 / Esploso assonometrico: vista dal basso.



83 / A destra. Vista assonometrica di dettaglio della PCB alloggiata nello chassis. I sensori IR e LDR sono direttamente saldati sopra il circuito mentre i LED UV si collegano tramite jumper per rendere più agevole l'assemblaggio dello chassis.

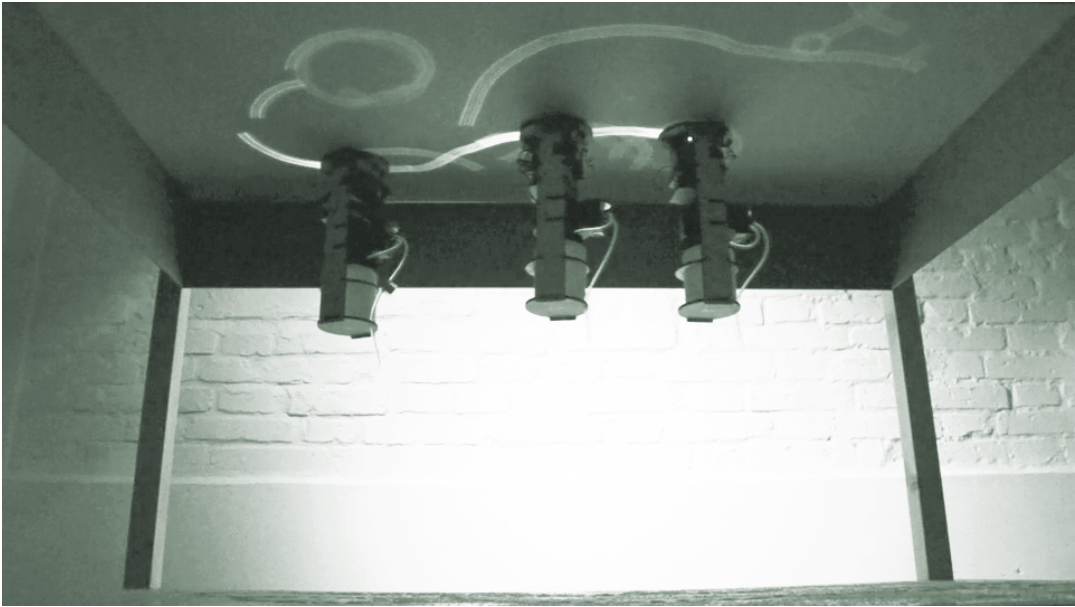
84 / Sotto. Il basamento che sostiene la PCB si compone di elementi in legno compensato 4 mm, tagliati a laser secondo un disegno che ne permette la giunzione con incastri e dentelli. I piani e le pareti che realizzano questa piccola impalcatura sono infine serrati da viti e dadi annegati nello spessore del compensato.





85 / Vista ed esploso assonometrico del dispositivo che permette al robot la deposizione della soluzione di acetato di sodio contenuta nel serbatoio. La pompa peristaltica viene raccordata all'albero del servomotore per mezzo di pezzi speciali realizzati in 3D printing.

CONCLUSIONI



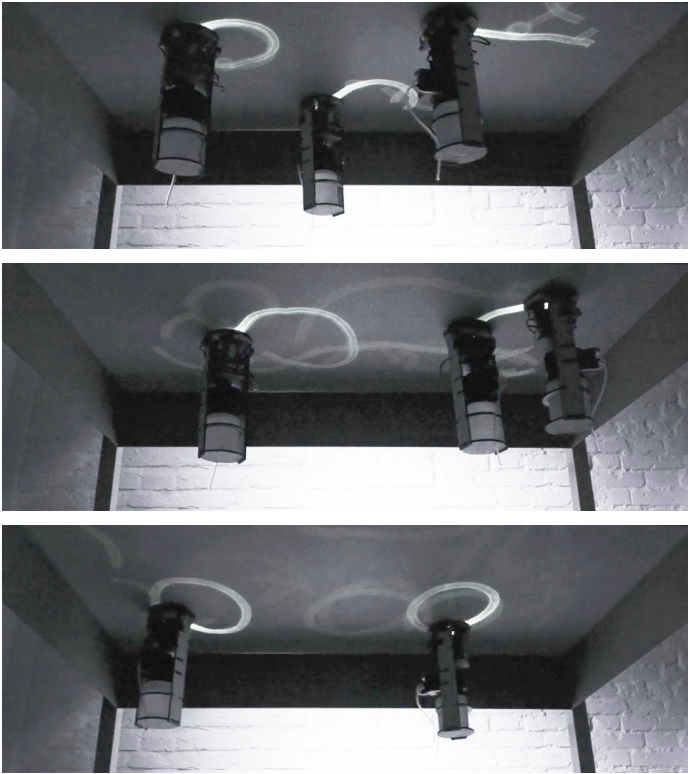
1 / In questa e nella pagina accanto. Fotosequenza dell'esperienza di deposito e costruzione robotica. Sono sovrapposte ed esibite tutte le strategie comportamentali descritte in precedenza: *obstacle avoidance*, *pheromone detection*, *material deposition*.

CONSIDERAZIONI FINALI

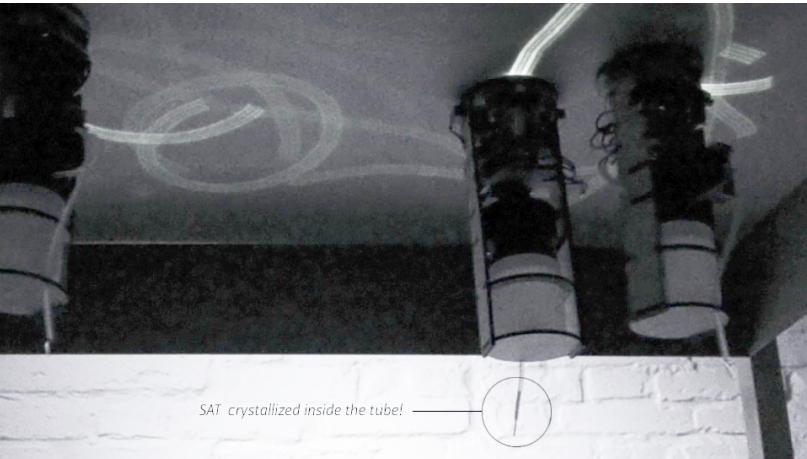
Le componenti comportamentali codificate nel firmware dell'agente robot sono infine testate in vista del processo di costruzione materiale. Con questo esperimento finale viene colta l'occasione per proporre un bilancio delle criticità rilevate nel prototipo elaborato, che si dimostra funzionale da un punto di vista logico-operativo, ma ancora inadeguato specie nelle caratteristiche di alcune componenti hardware utilizzate. Deve essere anzitutto riconosciuta l'importante relazione che intercorre tra aspetti dimensionali quali l'estensione dell'area di lavoro (*playground*) e l'ingombro superficiale complessivo della popolazione di agenti robot: le unità sono in questo caso molto grandi ma poche rispetto al *playground* su cui si muovono, non riuscendosi a raggiungere quella massa critica di interazioni che permentono il fenomeno emergente (evidente invece in simulazione).

2 / In basso a sinistra è visibile dall'alto l'esito della sessione di deposizione operata dalla squadra dei tre robot. La soluzione di acetato di sodio è stata distribuita senza alcun beneficio della guida stigmergica: manca ancora un consistente lavoro di affinamento circa le abilità cognitive del prototipo robot che non riguardano tuttavia errori di principio, bensì tolleranze da regolare opportunamente.

Ulteriormente, la sensibilità del sistema robotico alla lettura del segnale luminoso –proposto nel tentativo di attuare una delle componenti stigmergiche chemiotattiche– richiede una regolazione più precisa per consentire un *line-following* propriamente autonomo. Come primo accorgimento, è consigliabile una riduzione dell'interferenza luminosa sul playground, quindi una condizione di lavoro al buio totale (che nel presente lavoro si è evitata per documentare il lavoro con riprese video). Si fa notare che è possibile pure incrementare l' 'eccitabilità' del gel fosforescente, e dunque l'intensità della scia luminosa, additivando il prodotto reperibile in commercio con pigmento fosforescente secco. Con questi accorgimenti potrebbero ragionevolmente risolversi alcuni problemi di visibilità della scia luminosa da parte dei sensori LDR. Questi, poi, devono essere esposti a diretto contatto con la superficie rivestita dal gel: anche pochi millimetri di scostamento impediscono il rilevamento della scia, alterando la risposta chemiotattica desiderata. L'effetto combinato di un una grossolana regolazione della sensoristica, come nel caso appena descritto, con una proporzionalità tra caratteristiche estensive del sistema (estensione ambiente vs. estensione corpi robotici) produce risultati caotici privi di valore in fase di fabbricazione, come sperimentalmente verificato dall'esperimento illustrato ².



La scelta di un materiale particolarmente reattivo come l'acetato (sensibile sia rispetto quegli shock di natura meccanica che inevitabilmente accadono durante le manovre dei robot, sia rispetto impurità con cui è possibile il contatto) porta all'insorgere di situazioni critiche: durante lo svolgersi della prova, l'acetato ha cominciato a cristallizzare ad un estremo del condotto in uscita dalla pompa peristaltica, mettendola rapidamente fuori uso ³.



Il ripristino operativo del dispositivo peristaltico non è, tra l'altro, particolarmente agevole, essendo necessaria la rimozione e il disassemblaggio dell'intera parte meccanica dallo chassis.
Una disfunzione grave, rilevata questa volta a livello motorio, riguarda l'assenza di sistemi retroazionati sui microservo che guidano le ruote dei robot: osservando la dinamica delle traiettorie assunte dai robot, risulta evidente l'esistenza di un differenziale di rotazione –anche importante– tra motore destro e sinistro che fa deviare il moto del robot, in base alla prevalenza dell'uno o dell'altro. Questo variabilità è da imputarsi alla tolleranza delle resistenze con cui si altera l'elettronica dei microservi per la rotazione in continuo.
Si suggerisce a tal proposito di integrare sulla struttura meccanica delle ruote degli *encoder ottici* ⁴ che, misurando gli spostamenti angolari effettivamente prodotti a seguito di un comando e confrontandoli con quelli attesi, compensino il difetto o l'eccesso della rotazione trasferita alla ruota. Senza la risoluzione di questo grave malfunzionamento, molta dell'attività pratico-sperimentale rischia di essere compromessa.

- 3 / Nell'ingrandimento affianco è visibile il tratto di condotto che si è otturato a causa della prematura cristallizzazione dell'acetato.
- 4 / L'*encoder* o trasduttore di posizione angolare è un dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in brevi impulsi elettrici che devono essere elaborati da un circuito di analisi del segnale sotto forma di segnali numerici digitali.

Una importante considerazione dev'essere discussa a proposito dell'esplicita intenzionalità con cui si è cercato di mantenere estremamente semplice il modello di agency del prototipo robot. Le ragioni di questa scelta risiedono anzitutto nell'aderenza che si riesce a mantenere con i modelli biologici considerati distribuendo forme semplici di intelligenza agli agenti della popolazione. Inoltre, le ripercussioni in termini software > firmware>hardware producono economie di costo che si perderebbero lavorando, ad esempio, in ambienti strutturati ⁵ o ricorrendo a forme di comunicazione radio tra i robot. Certo la semplicità non è sempre a costo zero, intendendo che non sono sempre garantite performance elevate con dotazioni senso-motorie di basso profilo (come si è appena osservato nei risultati sperimentali). Dunque sarà in futuro importante bilanciare le risorse al fine di poter garantire una qualità minima sufficiente delle componenti tali da poter verificare i comportamenti elementari attesi.

Per quanto riguarda la capacità morfogenetica del sistema simulato, risulta evidente la necessità di scendere più in profondità nell'indagine delle specifiche possibilità tettoniche e formative. I livelli di complessità osservabili nei sistemi biologici cui ci si è spesso riferiti vanno ben oltre le sofisticazioni che si sono raggiunte con la simulazione multi-agente.

Dunque ci si deve forse interrogare sull'effettiva comprensione di certi fenomeni che interpretiamo con modelli parziali? O, forse, questo lavoro è il primo passo in una direzione di ricerca che, con il progressivo accelerare delle acquisizioni che saprà capitalizzare, potrà infine formulare una proposta coerente e praticabile di tecnologia costruttiva mediata da agenti robotici?

5 / Si parla di *ambiente strutturato* quando il robot ha coscienza della tipologia e delle relative caratteristiche geometriche.

BIBLIOGRAFIA

Papers e Articoli:

A. ANDRASEK, “*Open Syntesis // Toward a Resilient Fabric of Architecture*”, in LOG– Reclaim Resi[li]stance //R2 , n.25, Anyone Corp. (2012)

S. BURBECK, “*Stigmergy enables complex self organization in Multicellular Organisms*”, consultabile on–line – link

F. GRAMAZIO, M. KOHLER, et al., “*Aerial Robotic Construction Towards a New Field of Architectural Research*”, in International Journal of Architectural Computing, vol.10, n.3 (2012) – link

J. JONES, “*Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks*”, Centre for Unconventional Computing, University of the West of England, Coldharbour Lane, Bristol (2010) – link

N. OXMAN, et al., “*Freeform 3D Printing: toward a Sustainable Approach to Additive Manufacturing*”, in Green Design, Materials and Manufacturing Processes, Taylor&Francis (2013) – link

N. OXMAN, et al., “*Biological Computation for Digital Design & Fabrication, – A biologically–informed finite element approach to structural performance and material optimization of robotically deposited fibre structures*”, in eCAADe: Computation and Performance, Delft University of Technology, Delft (2013) – link

N. OXMAN, et al., “*Towards Swarm Printing*”, in AD – Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale, vol.84, n.3, Wiley, (2014)

R. OXMAN, “*Informed Tectonics in Material–based Design*”, in Theories of the Digital in Architecture, Routledge (2014)

M. SHERIF EL–ATTAR, “*Application of Artificial Intelligence in Architectural Design*”, a Ph.D Dissertation – Faculty of Engineering, Department of Architecture Al–Azhar University, Cairo (1997) – link

R. SNOOKS, “*Behavioral Matter – Pulsations of the Swarm*”, in Pulsation in Architecture, J Ross Publisher (2011)

R. SNOOKS, “*Volatile Formations*”, in LOG – Reclaim Resi[li]stance //R2 , n.25, Anyone Corp. (2012)

R. SNOOKS, “*Behavioral Composites and Robotic Fabrication*”, in Proceedings of the 7th International conference of AASA (2013) – link

Libri:

- V. BRAITENBERG, "*Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*", Bradford Book (1986)
- L. CARLUCCI AIELLO, M. CIALDEA MAYER, "*Invito all'Intelligenza Artificiale*", Franco Angeli (2004)
- K. von FRISCH, O. von FRISCH, "*L'Architettura degli Animali*", Arnoldo Mondadori Editore (1974)
- F. GRAMAZIO, M. KOHLER, "*Made by Robots – Challenging Architecture at a Larger Scale*", vol.84, n.3 (2014)
- J. HOLLAND, "*Complexity – A Very Short Introduction*", Oxford University Press (2014)
- J. REISER, "*Atlas of Novel Tectonics / Reiser+Umemoto*", Princeton Architectural Press (2006)
- S. RUSSEL, P. NORVIG, "*Artificial Intelligence – A Modern Approach*", Prentice Hall (2009)
- L. SPUYBROEK, "*The Architecture of Continuity: Essays and Conversation*", nai010 publishers (2009)
- M. WEINSTOCK, "*The Architecture of Emergence – The Evolution of Form in Nature and Civilisation*", Wiley (2010)
- S. WOLFRAM, "*A New Kind of Science*", Wolfram Media (2002)

RINGRAZIAMENTI

Grazie Alessio per la passione totale che ci metti. Che poi è contagiosa. Altrimenti mica mi ci infilavo in un lavoro così assurdo. Ma anche grazie per l'amicizia e per le occasioni di crescita.

Grazie Max. Se un estraneo bussasse alla tua porta raccontandoti tutta una serie di stranezze su robot che vorrebbe costruire per fargli fare cose ancor più strane...beh, glielo hai permesso.

Grazie Martino. Per la curiosità, i suggerimenti e le risposte che solo uno scienziato & freerider poteva darmi.

Ringrazio MakeInBo per il supporto inestimabile “dei saperi, delle macchine e delle mani” che lì puoi trovare.

Grazie Paolo per la disponibilità a condividere codice e parole sul tuo lavoro di Tesi.

Ringrazio con il cuore in mano i miei genitori e la mia famiglia tutta. Le premure che da tutti voi ho ricevuto durante questi lunghi anni di studio hanno saputo mantenermi in carreggiata fino alla fine.

Grazie Vero. Sempre presente. Sempre paziente. Non è stato facile, ma ce l'abbiamo fatta. Al solito, insieme.

Ringrazio Gianluca (senza esagerare altrimenti si monta la testa) con cui ho condiviso le angosce, paure, frustrazioni e le risate sceme di quest'ultimo periodo universitario. Forse anche per questo mi sono sentito un po' più leggero nel tagliare il traguardo.

Grazie a una serie di amicizie preziose come oro che ho scoperto con ritardo, come mio solito: Claudia e Lorenzo, Elisa, Marco, Paride, Lara, Rua, Saio. Ma anche Cecilia, Valentina, Stefano, Beppe. E poi La Juvanna e Lu Fra. Marco e Susan, Fede e Alex, Pam e Michel.

Grazie Sara per il prestito incondizionato della macchina digitale. Grazie Luca, col rullo ci vuole polso.

E grazie Pongo, per esser sempre in mezzo ai piedi.

ABSTRACT CONCRETE

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DA - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE/ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA IN
ARCHITETTURA E COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA 3
AA 2013/2014

Con questa Tesi di Laurea si muovono i primi passi di una ricerca applicata finalizzata alla costruzione-deposizione di materiale da parte di sciami di mini-robot dal comportamento indipendente che si coordinano tramite segnali lasciati e rilevati nell'ambiente in cui si muovono.

Lo sviluppo di tecniche di progettazione e fabbricazione digitale ha prodotto un aumento nel grado di interconnessione tra tecnologia e design, dunque, di nuove possibilità tettoniche. Le relazioni tettoniche tradizionali stanno infatti subendo una trasformazione radicale, potendo essere esplicitamente *informate* e dunque mediate attraverso gli strumenti digitali dall'ideazione alla produzione. Questa mediazione informata del contenuto tettonico (che opera costantemente) è distintivo di un approccio *material-based* alla progettazione che aumenta l'integrazione tra struttura, materia e forma entro le tecnologie di fabbricazione.